

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra elektroenergetiky

Návrh měřicího transformátoru napětí
Draft of measuring voltage transformer

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Jan Gavlas**
Studijní program: N2649 Elektrotechnika
Studijní obor: 3907T001 Elektroenergetika
Téma: **Návrh měřicího transformátoru napětí**
Draft of measuring voltage transformer

Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

1. Rozeberte problematiku měření napětí v sítích vvn.
2. Navrhněte měřicí transformátor v jednopólově izolovaném provedení pro jmenovité napětí 110 kV, T_p 0,5 %, o jmenovité zátěži 25 VA s izolačním médiem SF₆.
3. V rámci návrhu proveďte výpočet dovoleného pole chyb, včetně korekce.
4. Rozeberte dosažené výsledky a proveďte srovnání s transformátory olejovými.

Seznam doporučené odborné literatury:


Kopeček, Dvořák : Přístrojové transformátory, SNTL 1964
Havelka : Stavba elektrických přístrojů I, VUT Brno 1985
Král, Vaněk : Elektromagnetické přístroje, VUT Brno 1985
Novotný : Využití elektronegativního plynu SF₆ v elektrotechnice, SNTL 1982

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.


Vedoucí diplomové práce: **Ing. Zdeněk Hytka, CSc.**

Datum zadání: 01.09.2016

Datum odevzdání: 28.04.2017


prof. Ing. Stanislav Rusek, CSc.
vedoucí katedry




prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.
děkan fakulty

Čestné prohlášení

„Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.“

Ve Frýdku-Místku dne: 25. 4. 2017


.....
Bc. Jan Gavlas

Poděkování

Děkuji panu Ing. Zdeňku Hytkovi, Csc. za cenné rady a odborné vedení během vypracovávání této diplomové práce i své rodině za podporu během studia.

Abstrakt

V rámci této práce řeším návrh měřicího transformátoru napětí s parametry 110 kV/100 V, s třídou přesnosti 0,5 % o jmenovité zátěži 25 VA s izolačním médiem SF₆. Postupně jsem popsal přístrojové transformátory včetně měření, zapouzdřené rozvodny a vlastnosti plynu SF₆. Provedl jsem vysvětlení základních pojmů měřicího transformátoru napětí a korekci jeho chyb. Nakonec jsem realizoval výpočet pro zadaný transformátor napětí a provedl jsem jeho srovnání s olejovým transformátorem.

Klíčová slova:

Měřicí transformátor napětí, elektronegativní plyn SF₆, zapouzdřená rozvodna, korekce chyb, výpočet

Abstract

In this work I solve draft of voltage transformer with parameters 110 kV/ 100 V, accuracy class of 0.5% of rated power 25 VA with insulating medium SF₆. Gradually, I described the instrument transformers including measurement, encapsulated substations and gas properties SF₆. I did explanations the basic concepts of voltage transformer and his error correction. Eventually I realized the calculation for a given voltage transformer and his comparison with an oil transformer.

Keywords:

Measuring voltage transformer, electronegative gas SF₆, encapsulated substation, error correction, calculation

Obsah

Seznam použitých symbolů a zkratk	8
Seznam ilustrací a seznam tabulek	11
1. Úvod	12
2. Přístrojové transformátory	13
2.1. Účel a význam	13
2.2. Přístrojové transformátory vvn	13
2.3. Rozdělení přístrojových transformátorů	14
2.4. Rozdělení přístrojových transformátorů napětí	14
2.5. Značení svorek	15
2.6. Rozdělení transformátorů napětí podle vývodů	15
2.7. Charakteristika funkce přístrojového transformátoru napětí	15
2.8. Měřicí transformátory	16
2.9. Vliv chyb měřicích přístrojů na přesnost měření	16
2.10. Vlivy působící na přesnost přístrojových transformátorů napětí	17
3. Zapouzdřené rozvodny s izolačním médiem SF ₆	18
3.1. Požadavky na izolační látky	19
3.2. Vlastnosti elektronegativních plynů	19
3.3. SF ₆ – Fluorid sírový – Hexafluorid	20
4. Definice základních veličin transformátoru napětí	22
5. Náhradní schéma a fázorový diagram	26
5.1. Fázorový diagram	27
5.2. Chyby transformátoru napětí a diagramy chyb	30
5.3. Komplexní diagram chyb a pole dovolených chyb	31
5.4. Chod transformátoru naprázdno	33
5.5. Závislosti chyb na jednotlivých veličinách	34
5.6. Výpočet chyb a jejich složek	38
5.7. Úprava chyb – závitová korekce	39
5.8. Rozpětí chyb	40
5.9. Výpočet průchozí impedance a jejich složek z komplexního diagramu chyb	41
6. Výpočet transformátoru	44
6.1. Návrh magnetického obvodu transformátoru	44
6.2. Výpočet vinutí	47
6.3. Návrh primárního vinutí	48

6.4.	Návrh sekundárního vinutí	50
6.5.	Výpočet odporů vinutí a reaktancí	51
6.6.	Určení chyb transformátoru	53
7.	Zhodnocení	60
7.1.	Porovnání olejových a SF ₆ transformátorů	61
	Seznam literatury	62
	Seznam příloh	63

Seznam použitých symbolů a zkratek

Zkratka	Popis	Jednotka
B	Magnetická indukce	T
B	Susceptance transformátoru napětí	S
B_n, B_{\max}	Zvolená, maximální magnetická indukce	T
Cl	Chlór	
CO ₂	Oxid uhličitý	
D _{1i}	Průměr jádra, sekundárního vinutí a izolační mezery	mm
D _{1e}	Průměr jádra i s oběma vinutími	mm
D _{2i}	Průměr jádra i s izolačním předělem	mm
D _{2e}	Průměr sekundárního vinutí i s jádrem	mm
F	Fluor	
G	Vodivost transformátoru napětí	S
K	Kelvin	
$I_{1n}; I_{2n}$	Jmenovitý primární, sekundární proud	A
I_{10}	Proud příčné větve (komplexní součet I_{1Fe} a I_{1m})	A
I_{1Fe}, I_{2Fe}	Proud na krytí ztrát v železe	A
I_{1m}, I_{2m}	Magnetizační proud	A
I_1'	Přepočtený primární proud na počet sekundárních závitů	A
I_2'	Přepočtený sekundární proud na počet primárních závitů	A
I_{10}'	Přepočtený proud naprázdno na počet sekundárních závitů	A
K_{nm}	Činitel zvýšení napětí	
K_s	Konstanta měřicí soupravy	
L	Indukčnost	H
MPa	Megapascal	
N_e	Počet závitů na jeden volt	V ⁻¹
N_1, N_2	Počet závitů primárního, sekundárního vinutí	
N_1^k	Počet primárních závitů po korekci	
O_m	Obvod rozptylového kanálu	mm
P_0	Příkon naprázdno	VA
$P_{B,C}$	Zátěž pro daný bod B nebo C	VA
P_{Fe}	Ztráty transformátoru v železe	VA
P_{ku}, P_n	Krajní, jmenovitá zátěž transformátoru napětí	VA
R	Činný odpor, průchozí odpor	Ω
R_{Fe}	Náhradní odpor ztrát v železe	Ω
R_s	Zakřivení délky střední siločáry jádra	mm
R_v	Odpor připojovaného vedení	Ω
R_1, R_2	Činný odpor primárního, sekundárního vinutí	Ω
R'_{12}	Přepočtený odpor R_1 na sekundární vinutí	Ω
R'_{21}	Přepočtený odpor R_2 na primární vinutí	Ω
R_5	Zakřivení jádra magnetického obvodu	mm
R_{20}, R_9	Odpor při teplotě $\vartheta = 20$ K, Odpor při teplotě ϑ	Ω
SF ₂	Fluorid siřnatý	
SF ₄	Fluorid siřčitý	

SF_6	Fluorid sírový	
S_{Fe}	Průřez jádra magnetického obvodu	mm^2
S_i	Skutečný průřez jádra magnetického obvodu	mm^2
S_1, S_2	Průřez vodiče primárního, sekundárního vinutí	mm^2
S_1'	Průřez zesíleného vodiče primárního vinutí	mm^2
S_{v1}, S_{v2}	Minimální průřez primárního, sekundárního vodiče	mm^2
T_p	Třída přesnosti	%
U_{10}, U_{20}	Indukované napětí na primárním, sekundárním vinutí	V
U_{1n}, U_{2n}	Jmenovité primární, sekundární vinutí	V
U_m, U_n	Nejvyšší, jmenovité napětí soustavy	V
U_{nm}	Zvýšené napětí (Zkušební na oteplení)	V
U'_{10}	Přepočtená hodnota U_{10} na počet sekundárních závitů	V
U'_2	Přepočtené sekundární napětí	V
U'_{20}	Přepočtená hodnota U_{20} na počet primárních závitů	V
VN, VVN	Vysoké napětí, velmi vysoké napětí	V
X_1, X_2	Reaktance primárního, sekundárního vinutí	Ω
X'_1	Přepočtená X_1 na sekundární počet závitů	Ω
X'_2	Přepočtená X_2 na primární počet závitů	Ω
X_m, X_σ	Rozptylová reaktance vinutí	Ω
Y	Admitance, břemeno transformátoru napětí	S
Y_n, Y_0	Břemeno transformátoru napětí jmenovité, naprázdno	S
a	chyba úhlu v procentech, délka přímky	%
a_0	Měrné budicí proudění celkové	$A \cdot m^{-1}$
b_{r1}, b_{r2}	Redukovaná šířka primárního, sekundárního vinutí	mm
b_1	Výška primárního, sekundárního vinutí	mm
b_{1-5}	Rozměry jednotlivých stupňů jádra	mm
$\cos\beta$	Sekundární účinník transformátoru napětí	
d	Průměr kružnice opsané kolem jádra	mm
d_1, d_2	Vnitřní průměr primárního, sekundárního vinutí	mm
d_{i1}, d_{i2}	Průměr izolovaného primárního, sekundárního vodiče	mm
d'_{i1}	Průměr izolovaného zesíleného primárního vodiče	mm
d_{s1}	Průměr středního závitu primárního vinutí	mm
d_{v1}, d_{v2}	Minimální průměr primárního, sekundárního vodiče	mm
f	frekvence	Hz
h	Výška magnetického obvodu	mm
h_{1i}, h_{1e}	Šířka primárního vinutí na začátku, na konci	mm
h_1'	Přepočtená šířka 1. a poslední polohy primárního vinutí	mm
h_1, h_2	Šířka primárního, sekundárního vinutí	mm
k_m, k_T	Konstanta měřicího přístroje, konstanta měřicího transformátoru	
k_u, k_{sk}	Jmenovitý, skutečný převod transformátoru napětí	
l	Délka magnetického obvodu	mm
l_{Fe}	Délka střední siločáry jádra	m
l_{pp}	Délka poslední polohy primárního vinutí	mm
k_o	Činitel stupňů jádra	
l_1, l_2	Délka vodiče primárního (pro d_{i1}), sekundárního vinutí	m
l_1'	Délka vodiče primárního vinutí pro průměr d_{i1}'	m

l_{p1}, l_{p2}, l_{p122}	Délka určité polohy primárního vinutí	mm
m_{Fe}	Hmotnost jádra	kg
m_{v1}, m_{v2}	Hmotnost primárního, sekundárního vinutí	kg
n	Počet závitů v jedné poloze sekundárního vinutí	
n_{p2}	Počet poloh sekundárního vinutí	
n_1, n_2, n_{122}	Počet závitů určité polohy primárního vinutí	
p_{Fe}	Měrné ztráty	$W \cdot kg^{-1}$
r_1, r_2	Přepočtený odpor primárního, sekundárního vinutí na 1 závit	$\Omega \cdot Z^{-1}$
t	Tloušťka izolace	mm
$tg\beta_k$	Vnitřní účinník	
t_{sk}	Předěl mezi jádrem a sekundárním vinutím	mm
v_a	Výška těžiště primárního vinutí	mm
x_σ	Přepočtená rozptylová reaktance na 1 závit	$\Omega \cdot Z^{-1}$
α_T	Teplotní součinitel	K^{-1}
α	Úhel mezi budicím proudem a jeho magnetickou složkou	°
β	Úhel mezi zatěžovacím proudem I_2 a napětím U_2	°
ΔN_1^k	Závitová korekce	
ΔU	Fázorová chyba, fázor úbytku, celkový úbytek transformátoru	V
ΔU_1	Úbytek na primární straně	V
$\Delta U'_2$	Úbytek na sekundární straně přepočtený na primární stranu	V
$\Delta \theta$	Teplotní rozdíl	K
$\Delta \delta_u$	Rozpětí chyb úhlu	min
$\Delta \varepsilon_u$	Rozpětí chyb napětí	%
$\Delta \varepsilon_R$	Změna úbytku na průchozím odporu	%
$(\Delta \varepsilon_u)_P, (\Delta \varepsilon_u)_u$	Rozpětí chyb napětí podle zátěže, podle napětí	%
δ	Izolační vzdálenost mezi primárním a sekundárním vinutím	mm
δ_u	Chyba úhlu transformátoru napětí	min
δ_{u0}	Chyba úhlu naprázdno	min
$\delta_{u0R}, \delta_{u0X}$	Složky chyby úhlu naprázdno proudu naprázdno I_{20}	min
δ_{uR}, δ_{uX}	Složky chyby úhlu zatěžovacího proudu I_2	min
δ_{uy}, δ_{un}	Chyba úhlu při zatížení, Celková chyba úhlu	min
$\varepsilon_{RB, C}$	Úbytek na průchozím odporu pro body B nebo C	%
ε_{XB}	Úbytek na průchozí reaktanci pro bod B	%
ε_u	Chyba napětí transformátoru napětí	%
ε_{u0}	Chyba napětí naprázdno	%
$\varepsilon_{u0R}, \varepsilon_{u0X}$	Složky chyby napětí naprázdno proudu naprázdno I_{20}	%
$\varepsilon_{uR}, \varepsilon_{uX}$	Složky chyby napětí zatěžovacího proudu I_2	%
ε_{uy}	Chyba napětí při zatížení	%
$\varepsilon_{un}, \varepsilon_{unk}$	Celková chyba napětí, Chyba napětí po korekci	%
ϕ	Magnetický tok	Wb
μ_c, μ_w	Permeabilita	$H \cdot m^{-1}$
v	korekce chyby napětí	%
ρ, ρ_{20}	Měrný odpor mědi při $\Delta \theta = 20$ K, při teplotě $\theta = 20$ K	$\Omega \cdot m^{-1}$
γ_{cu}, γ_{Fe}	Měrná hmotnost mědi, železa	$kg \cdot m^{-3}$
σ	Proudová hustota	$A \cdot mm^{-2}$
ξ	Činitel plnění magnetického obvodu	

Seznam ilustrací a seznam tabulek

Seznam obrázků

Obrázek 1 - Čtyřvodičová soustava (vlevo) a třívodičová soustava (vpravo) [1]	16
Obrázek 2 - Zapouzdřená rozvodna v Moravanech [2].....	18
Obrázek 3 - Struktura molekuly SF ₆ [7]	21
Obrázek 4 - Náhradní schéma transformátoru napětí [5]	26
Obrázek 5 - Fázorový diagram napěťového transformátoru [5]	27
Obrázek 6 - Pootočený fázorový diagram napěťového transformátoru [5].....	28
Obrázek 7 - Fázorový diagram s úbytkovou částí přepočtený na sekundární závity [5].....	29
Obrázek 8 - Fázorový diagram pro změnu zátěže a pro změnu napětí U_1 [5].....	30
Obrázek 9 - Základ pro vytvoření komplexního diagramu chyb [5].....	31
Obrázek 10 - Komplexní diagram chyb [5].....	31
Obrázek 11 - Převod na minuty [5]	32
Obrázek 12 – Kompletní komplexní diagram chyb pro všechny třídy přesnosti	33
Obrázek 13 – Schéma transformátoru při stavu naprázdno	33
Obrázek 14 – Závislost chyb na břemeni v komplexním diagramu [5]	34
Obrázek 15 – Závislost chyb napětí na břemeni [5].....	35
Obrázek 16 – Závislost chyb úhlu na břemeni [5]	35
Obrázek 17 – Závislost chyb na napětí v komplexním diagramu [5].....	36
Obrázek 18 - Závislost chyby napětí na napětí [5].....	36
Obrázek 19 – Závislost chyby úhlu na napětí [5].....	36
Obrázek 20 – Závislost chyb na sekundárním účínku v komplexním diagramu [5].....	37
Obrázek 21 – Zobrazení chyby napětí, chyby úhlu a jejich složek [5]	38
Obrázek 22 - Rozpětí chyb [5]	40
Obrázek 23 - Průchozí impedance v komplexním diagramu [5].....	42
Obrázek 24 – Změna složky ε_R po započítání činného odporu [5]	42
Obrázek 25 – Závislost dovolených úbytků na zátěži [5]	43
Obrázek 26 – Odstupňované jádro[6]	45
Obrázek 27 - Magnetický obvod transformátoru	45
Obrázek 28 - Rozměry primárního vinutí pro výpočet výšky těžiště v_a	49
Obrázek 29 - Rozměry vinutí transformátoru	52
Obrázek 30 - Komplexní diagram chyb před korekcí	58
Obrázek 31 - Komplexní diagram chyb po korekci	59

Seznam tabulek

Tabulka 1 – Seznam vybraných elektronegativních látek [4]	20
Tabulka 2 - Dovolené chyby měřicích transformátorů napětí [5]	25
Tabulka 3 – Odečet hodnot pro výpočet admitance naprázdno (plech Eo 11) [5]	54
Tabulka 4 - Výpočet admitance transformátoru napětí	54
Tabulka 5 - Výsledné chyby transformátoru (Obrázek 30).....	56
Tabulka 6 - Výsledné chyby transformátoru po korekci (Obrázek 31).....	57

1. Úvod

Přístrojové transformátory pracují na principu elektromagnetické indukce a slouží k spolehlivému a hospodárnému chodu výroby, rozvodu a spotřebě elektrické energie. Zajišťují měření vyrobené i dodávané elektrické energie.

V této diplomové práci je popsán rozbor přístrojových transformátorů, jejich základní definice a zapojení při měření v síti. Jednotlivé kapitoly se zabývají fázorovým diagramem, závislostí a korekcí chyb transformátorů. Dále jsem se zabýval rozbořem zapouzdřených rozvodů i elektronegativního plynu, fluoridu sírového, SF_6 . V následující kapitole jsem provedl postup návrhu výpočtu transformátoru napětí, načež jsem zhodnotil dosažené výsledky a uvedl jsem srovnání olejových a SF_6 transformátorů.

Pro matematický postup návrhu je uvažován měřicí napěťový transformátor vvn 110 kV, jednopólově izolovaný, s kmitočtem 50 Hz, sloužící k oddělení vvn sítě od měřících obvodů. Zadan je transformační převod 110000/100 V. Jeho jmenovité zatížení se předpokládá 25 VA a třída přesnosti T_p je 0,5 %. U transformátoru se uvažuje jeho vnitřní používání, nebude tedy namáhaný povětrnostními podmínkami, což má vliv na rozměry izolací a délku povrchové cesty.

2. Přístrojové transformátory

Měřicí a jistící transformátory spadají do jedné skupiny nazývané přístrojové transformátory. Jsou to netočivé stroje, které pracují na principu elektromagnetické indukce.

Rozsah elektrických veličin v elektrizačních soustavách je značný: např. proudy mohou být řády ampérů a kiloampérů, napětí řádu desítek voltů až stovek kilovoltů. Přizpůsobovat proudové i napěťové systémy měřicích, jistících i regulačních přístrojů není žádoucí z hlediska technického, ani hospodářského. Proto tyto přístroje nezapojujeme do elektrických obvodů přímo, nýbrž nepřímo, a to přes transformátory proudu a napětí, zvané transformátory přístrojové, jejichž konstrukce a funkce jsou k tomuto účelu zvlášť přizpůsobeny.

Tak jako přístroje, které napájí, dělí se přístrojové transformátory na dvě skupiny, a to na transformátory měřicí a transformátory jistící. Bývají při tom často konstruovány tak, že mohou současně působit jako měřicí i jistící. Mívají např. několik sekundárních výstupů, z nichž některé mají vlastnosti potřebné pro napájení měřicích přístrojů a jiné pro napájení přístrojů jistících (obvykle u transformátoru proudu), nebo mohou být užity buď jako měřicí, nebo jistící, vyhovují-li v určitých mezích požadavkům buď na měření nebo na jištění nebo obojím současně (obvyklé u transformátorů napětí). Proto nelze mezi oběma skupinami vést určitou hranici. [1]

2.1. Účel a význam

- a) Transformují hodnoty proudu a napětí na standardní hodnoty vhodné pro napájení proudových a napěťových cívek jednotně provedených systémů přístrojů, které proto mohou být hospodárně konstruovány a vyráběny v omezeném počtu typů a velkých sériích
- b) Izolují obvod vysokého napětí (elektrizační soustavy) od obvodů nízkého napětí (přístrojů), čímž je zajištěna bezpečnost obsluhy i přístrojů
- c) Vzdalují měřicí a jistící přístroje z dosahu působení silných magnetických a elektrických polí proudových obvodů elektrizační soustavy a tak vylučují jejich nepříznivé působení na správnou funkci připojených přístrojů a na přesnost měření.
- d) Dovolují přehledně a účelně soustředit měřicí a jistící přístroje v dozornách mimo rozvodny, a tím přispět k snadnému a pohotovému ovládání a řízení provozu rozvodny i celých sítí
- e) Chrání vhodnou konstrukcí (u transformátorů proudu) systémy měřicích i jistících přístrojů před škodlivými dynamickými i tepelnými účinky nadproudů při poruchových stavech v elektrizační soustavě [1]

2.2. Přístrojové transformátory vvn

Vedle požadavků na malé rozměry, malou váhu, vysoké technické parametry, provozní bezpečnost a spolehlivost, hrají důležitou roli i otázky výroby, možnost dopravy, skladování a montáže.

Izolace mezi primárním a sekundárním vinutím bývá řešena buď v jednom stupni, nebo i v několika stupních, tj. v izolační kaskádě. Transformátory proudu až do jmenovitého izolačního napětí 220 kV se stavějí převážně s izolací v jednom stupni, kdežto kaskádové řešení je více rozšířeno u transformátorů napětí. Přístrojové transformátory na vvn se dnes převážně vyrábějí jako olejové, a to v provedení nádobovém, kde funkční části jsou v nádobě s olejem a vývody primárního vinutí jsou vyvedeny průchodkou, chráněnou porcelánovým převlekem nebo v provedení plášťovém, u něhož porcelánový plášť tvoří současně nádobu. V dnešní době se začínají do světa stále více expandovat transformátory, a celkově zapouzdřené rozvodny, s elektronegativním plynem SF₆. [1]

2.3. Rozdělení přístrojových transformátorů

- a) podle transformované veličiny rozlišujeme na transformátory:
 - proudu
 - napětí
 - kombinované
- b) podle funkce dělíme transformátory na:
 - měřicí- určené pro měřicí přístroje
 - musí být přesné v okolí jmenovitých hodnot
 - v přechodných stavech (zkrat, přepětí apod.) není vyžadována vysoká přesnost
 - při velkých nadproudech je žádoucí, aby se přesytily a tím omezovaly sekundární proud tak, aby nedošlo ke zničení měřicího přístroje
 - jisticí - určené pro ochrany
 - musí zajišťovat žádanou přesnost při velkých nadproudech a nízkých napětích
- c) podle umístění dělíme transformátory:
 - pro vnitřní montáž
 - pro venkovní montáž
- d) podle druhu izolace
 - vzduchové
 - olejové
 - epoxidové
- e) podle montáže
- f) podle převodu [1]

2.4. Rozdělení přístrojových transformátorů napětí

- a) podle způsobu transformace
 - indukční
 - kapacitní - jsou složeny z kapacitního děliče, kompenzační tlumivky a izolačního indukčního transformátoru

b) podle počtu fází a podle izolace primárního vinutí

- jednofázové - jednopólově izolované (měří fázové napětí)
 - dvoupólově izolované (měří fázové a sdružené)
- třífázové - uzemněné (zapojení do hvězdy)
 - neuzemněné (zapojení do hvězdy i do trojúhelníku)

2.5. Značení svorek

Transformátory proudu: **K, L** a **k, l**

Transformátory napětí:

- Jednopólově izolované: **M, O** a **m, o**
- Jednofázové dvoupólově izolované: **M, N** a **m, n**
- Trojfázové: **A, B, C** a **a, b, c** [1]

2.6. Rozdělení transformátorů napětí podle vývodů

Jednopólově izolovaný - J - jednofázový transformátor s jedním pólem primárního vinutí izolovaným proti uzemněným částem na jmenovité izolační napětí a druhým pólem za provozu uzemněným

Dvoupólově izolovaný - D - jednofázový transformátor s celým primárním obvodem a oběma jeho póly plně izolovanými proti uzemněným částem na jmenovité izolační napětí

Trojfázový, plně izolovaný - T - nulový bod primárních obvodů spojených do hvězdy izolován na jmenovité izolační napětí; nulový bod není vyveden na zvláštní svorky

Trojfázový, uzemněný - P - primární obvody spojené do hvězdy a nulový bod vyvedený a za provozu uzemněný [1]

2.7. Charakteristika funkce přístrojového transformátoru napětí

Jejich primární vinutí je zapojeno paralelně k obvodu (vedení), jehož napětí se transformuje do obvodu sekundárního (připojených přístrojů). Charakteristické vlastnosti jsou proto obdobné jako u transformátorů výkonových a transformátor napětí je ve své podstatě výkonový transformátor o malém typovém výkonu a malém napětí nakrátko (malé průchozí impedanci). Poměr počtu závitů vinutí primárního N_1 a sekundárního N_2 se rovná (nehledíme-li v prvním přiblížení k chybě napětí) poměru primárního napětí U_1 a sekundárního napětí U_2 , kdežto proudy v obou vinutích závisejí na zátěži odebírané na sekundárních svorkách a na budícím příkonu podobně jako u výkonových transformátorů. [1]

2.8. Měřicí transformátory

Měřicí transformátory napájejí cívky měřicích přístrojů a zpravidla zvyšují rozsah měřicího přístroje. Konstanta měřicí soupravy složené z měřicího přístroje o konstantě k_m a měřicího transformátoru s převodem k_T je:

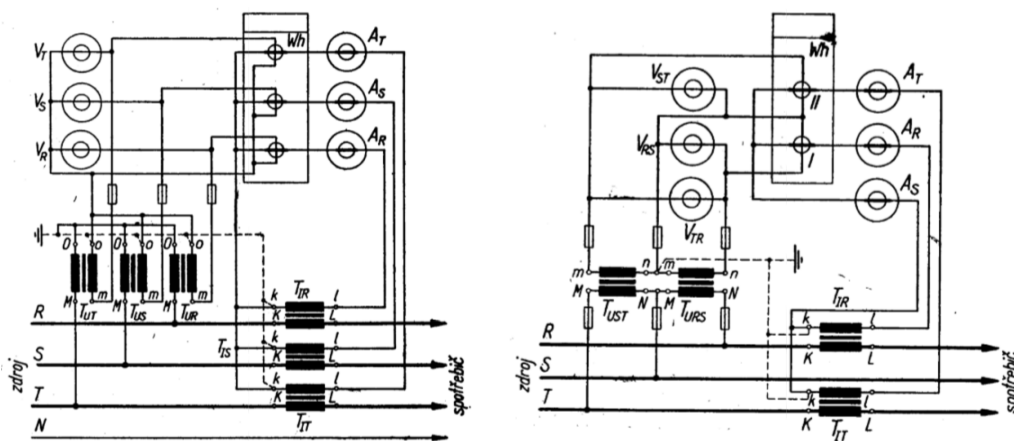
$$K_S = k_m \cdot k_T [-] \quad (1)$$

Při měření výkonu, elektrické práce, kde jsou zapojeny wattmetry s elektroměry na měřicí transformátory napětí s převodem k_U a měřicí transformátory proudu s převodem k_I , je výsledná konstanta celé soupravy:

$$K_S = k_m \cdot k_U \cdot k_I [-] \quad (2)$$

Zapojení měřicích přístrojů a měřicích transformátorů v soustavě třífázové s nulovým vodičem (čtyřvodičové) je vlevo na obrázku 1. Toto zapojení je prakticky shodné s třemi soustavami jednofázovými. Wattmetry a elektroměry mají tři měřicí systémy spolu spojené. U trojfázové soustavy bez nulového vodiče (třívodičové) se nejčastěji používá Aaronovo zapojení (dvou wattmetrové). Wattmetry a elektroměry mají dva měřicí systémy spolu mechanicky sprážené. Pro měření postačí zapojení dvou transformátorů proudu a dvou transformátorů napětí. (obrázek 1 vpravo).

U měřicích přístrojů s dvojitým systémem cívek, z nichž jedna je napájena z transformátoru napětí a druhá z transformátoru proudu, je nutné dodržet správné označení polarit. U ampérmetrů, voltmetrů a jiných přístrojů s jedním systémem měřicích cívek je funkce těchto přístrojů na polaritě nezávislá. [1]



Obrázek 1 - Čtyřvodičová soustava (vlevo) a třívodičová soustava (vpravo) [1]

2.9. Vliv chyb měřicích přístrojů na přesnost měření

Chyba proudu ε_I a chyba napětí ε_U se projeví při všech měřeních, kde se použije měřicích přístrojů s měřicími transformátory. Chyba úhlu δ_I nebo δ_U má vliv pouze na měření, kde výchylka měřicího přístroje je závislá na fázovém posunu proudu a napětí, tj. při měření výkonu, elektrické práce a podobně. [1]

2.10. Vlivy působící na přesnost přístrojových transformátorů napětí

a) Vliv kmitočtu

Kmitočet může v síti kolísat v rozsahu ± 1 %. Přesnost těchto transformátorů je zaručena pro kmitočet jmenovitý, uvedený na štítku.

Vliv kmitočtu na přesnost těchto transformátorů je poněkud složitější, protože se změnou kmitočtu se mění jak chyba naprázdno vyvolaná magnetizačním proudem, tak i chyba břemene, způsobená průchozí impedancí transformátoru, viz odstavec 5.6 a 5.9.

b) Vliv tvaru sinusové křivky

Přesnost přístrojových transformátorů je stanovena pro sinusový průběh měřené veličiny. Křivka proudu nebo napětí však někdy bývá zkreslena vyššími harmonickými (např. v síti, kde je provedena kompenzace účinníku statickými kondenzátory, má křivka napětí řadu vyšších harmonických, rovněž tak proud naprázdno u výkonových transformátorů bývá značně zkreslen). Tímto se i mění přesnost transformace. [1]

3. Zapouzdřené rozvodny s izolačním médiem SF₆

Výhody:

- zmenší se prostor rozvodny (cca 1/10 rozlohy oproti klasickým rozvodnám)
- rozvodu lze umístit co nejbližší k místu spotřeby
- krátká doba uvedení do chodu
- splývá s okolím (možnost přímého umístění v budově s jiným využitím)
- vysoká bezpečnost a spolehlivost
- ochrana proti vnějším vlivům
- minimální náklady na údržbu; hledá se únik plynu – Číchače

Nevýhody:

- pořizovací náklady
- výrobní základna (výrobce SIEMENS, ABB)
- náročné technologické postupy při výrobě
- náročnější zkoušení
- plyn SF₆ patří mezi plyny ohrožující ozónovou vrstvu podle Kjótovského protokolu – 1 kg SF₆ odpovídá 22 000 kg CO₂



Obrázek 2 - Zapouzdřená rozvodna v Moravanech [2]

Druhy zapouzdření:

Jednofázové – jeho výhodou je, že pouzdra vylučují působení elektrodynamických sil mezi fázemi i vznik třífázového zkratu. Přípojnice a další přístroje jsou umístěny v ose uvnitř válcových pouzder. Vznikají zde však určité ztráty průchodem podélných proudů pouzdry při normálním provozním stavu. Další přídavné ztráty vznikají vířivými proudy v pouzdrech, které při použití feromagnetických materiálů mohou nabýt významných hodnot. Proto se jednofázová pouzdra vyrábějí buď z nemagnetické oceli, nebo z hliníku a jeho slitin. Ocel se používá pouze na pouzdra vypínačů. [3] Jednofázové zapouzdření, viz obrázek 2.

Trojfázové - má podstatnou výhodu v menších nákladech a menších celkových rozměrech zapouzdřené rozvodny, protože zapouzdření je společné pro všechny tři fáze, mezi nimiž se uzavírá

magnetické pole, nevznikají v pouzdrech ztráty vlivem podélných a vířivých proudů, takže lze obvykle použít i oceli na výrobu pouzdra. Tohle použití činí celou konstrukci jednodušší a přehlednější. Na druhé straně vzniká nevýhodná situace z hlediska elektrického pole uvnitř zapouzdření a nutnosti zachytit elektrodynamické síly mezi vodiči. Vznikají vysoké nároky na kvalitu povrchu jednotlivých vodičů a provedení třífázových izolátorů je složité. V případě poruchy je nutné počítat se vznikem třífázového zkratu, vedoucího k vysokému namáhání s následným poškozením rozvodny. [3]

Kombinované - je mnohdy využíváno pro jednoduché části (např. přípojnice), které jsou zapouzdřeny jednofázově a ostatní přístroje jsou zapouzdřeny trojfázově. Obojí má své výhody. Nelze říct obecně, které řešení je optimální. V období návrhu je to spíše záležitost psychologická, protože riziko vnitřní poruchy lze vyhodnotit až na základě dlouhodobých provozních zkušeností. [3]

3.1. Požadavky na izolační látky

Při použití izolačních plynů pro techniku vysokých napětí, v rozvodných zařízeních a spínacích zařízeních vn a vvn se uplatňují jejich následující vlastnosti:

- malá hmotnost proti pevné nebo kapalně izolaci, a tím možnost snadnějšího, konstrukčního řešení příslušných zařízení
- regenerace izolačních vlastností plynné izolace po průrazu
- nehořlavost a chemická stálost izolačních plynů
- minimální ovlivnění okolního prostředí umožňující umístění rozvodných zařízení vn a vvn přímo v centrech spotřeby v hustě zalidněných oblastech
- velká elektrická pevnost nových plynů, která je pro SF_6 i freon 12 asi 2,5krát větší než u vzduchu za stejných podmínek, v homogenním nebo mírně nehomogenním poli
- odstranění vlivu okolního prostředí na povrchovou elektrickou pevnost izolace umístěním části pod napětím do pouzder naplněných SF_6 (tzv. zapouzdřené rozvodny)
- bezpečnost obsluhy proti dotyku živých částí nebo práci v silném elektrickém poli [4]

3.2. Vlastnosti elektronegativních plynů

Plyny jsou za normálních okolností dobrými izolanty. Jejich průraz v elektrickém poli nastává za přítomnosti nabitých částic, iontů a elektronů, které při dostatečné rychlosti zprostředkují přenos náboje mezi elektrodami v plynu. Rozhodující jsou při tom volné elektrony, které jsou urychlovány elektrickým polem a způsobují nárazovou ionizaci. Proto největší elektrickou pevnost budou vykazovat tzv. elektronegativní plyny, které mají schopnost zachycovat volné elektrony. Tato vlastnost je závislá na uspořádání a počtu elektronů v obalu jádra atomu. Můžeme říci, že nejsilnější schopnost přitahovat elektrony a tvořit záporné ionty budou mít atomy prvků, kterým v poslední vnější dráze chybí jeden elektron do plného obsazení, tedy halogenní prvky Cl, F. Tabulka 1 udává seznam vybraných plynů s údajem poměrné elektrické pevnosti, vztažené na elektrickou pevnost dusíku za normálního tlaku. Dále je uvedena teplota spodní hranice plynného skupenství (bod varu). Těchto látek je velké množství a pro použití v praxi musí být v plynném skupenství v celém rozsahu pracovních teplot od $-30^{\circ}C$ až do $+120^{\circ}C$. [4]

Pro izolační účely vyhovují vybrané plyny s velkou elektrickou pevností, a to:

- fluorid sírový SF_6 - vyhovuje všem požadavkům
- freon 12 - CCl_2F_2 - vyhovuje pro izolační účely, snadno dostupný a levnější, než SF_6 a přesto není vhodný pro případy s možností vzniku elektrického oblouku. [4]

Tabulka 1 – Seznam vybraných elektronegativních látek [4]

Chemická značka	CCl ₄	SeF ₆	CCl ₃ F	C ₂ Cl ₂ F ₂	C ₃ F ₈	SF ₆	SOF ₂	CC ₂ F ₂	C ₄ F ₈	CF ₄	N ₂	CO ₂
Poměrná elektrická pevnost	6,3	4,5	3 až 4,4	2,8	2 až 2,9	2,3 až 2,5	2,5	2,4 až 2,5	2,4	1,1	1	0,9
Teplota varu	+76	+49,2	+24,1	+38	-36,7	-63,8	-30	-28	-6	-126	-195,8	-78

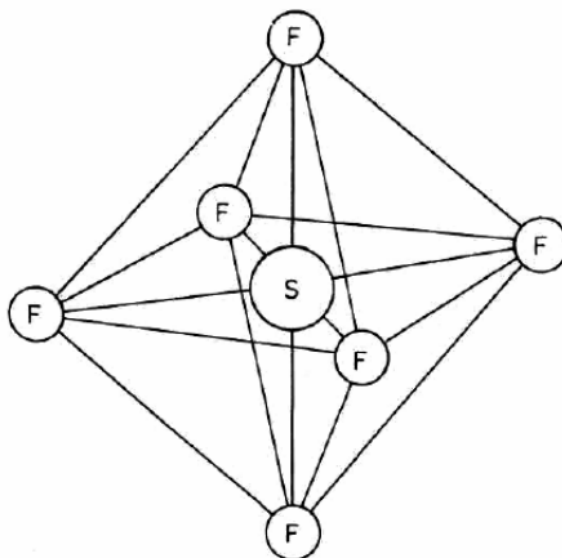
3.3. SF₆ – Fluorid sírový – Hexafluorid

Fyzikálně chemické vlastnosti

Fluorid sírový, chemická značka SF₆, je syntetický, plyn inertní povahy, bezbarvý a bez zápachu. Má velkou hustotu 6,6164 kgm⁻³ za normálních podmínek teploty a tlaku (20 °C, 0,101325 MPa). Vzduch má při těchto podmínkách hustotu 1,164 kgm⁻³. SF₆ je tedy asi 5x těžší než vzduch. Z toho plyne možnost udušení tímto plynem. Čistý plyn je zcela nejedovatý, ale také nedýchatelný, protože neobsahuje kyslík. Vlivem větší hustoty, než má vzduch, se shromažďuje na nejníže položených místech, a proto je nutné počítat s příslušnou ventilací těchto prostorů.

Fluorid sírový se obvykle vyrábí elektrolyzou z roztoku fluorovaných solí při teplotě lázně asi 100 °C. Při výrobě vznikají další fluoridy síry (SF₄, SF₂ apod.) popřípadě jiné příměsi. Takže se plyn musí velice pečlivě čistit. Podmínky čistoty nového plynu SF₆ pro průmyslové použití jsou dnes normalizovány v normách, kde jsou udány také doporučené metody zkoušek čistoty. Pro své vlastnosti má čistý plyn SF₆ bohaté použití v elektrotechnickém průmyslu. Vodní páry představují nejčastější nečistotu plynu v zařízeních SF₆, protože jsou pohlceny v konstrukčních materiálech a uvolňují se z nich. Voda způsobuje při kondenzaci na povrchu izolantů zhoršení izolační pevnosti a reaguje se zplodinami rozkladu SF₆ elektrickým obloukem, což vede ke vzniku agresivních látek napadajících okolní materiály. Při použití v praxi je tedy nutné věnovat hlavní pozornost malé vlhkosti v plynu SF₆. [4]

Chemické vlastnosti SF₆ jsou určeny stavbou jeho molekuly, která představuje úplně nasycené vazby jednoho atomu síry se šesti atomy fluóru, uspořádaných v rozích osmistěnu podle obrázku 3. Proto má plyn SF₆ inertní povahu a je chemicky neaktivní.



Obrázek 3 - Struktura molekuly SF₆ [7]

Je nehořlavý, nereaguje s kyslíkem, vodíkem a kyselinami, je nerozpustný ve vodě. Je stabilní v širokém rozsahu teplot do 500°C, při vyšších teplotách se postupně rozkládá na nižší fluoridy. Elektrickým obloukem nebo výbojem a vysokou teplotou 1500 - 2500 K se rozkládá, při 3000 K je zcela rozložen. Většina rozkládaných produktů je nestabilní a rekombinují zpět na původní plyn. U zhášení elektrického oblouku je nutné počítat s rozkladem části plynu, přičemž vznikají pevné zplodiny (hlavně fluoridy kontaktních kovů) a plynné zplodiny. Jejich složení závisí na druhu nečistot obsažených v plynu, proto zplodiny obsahují další prvky, jako například kyslík, vodík, uhlík atd. [4]

Souhrn vlastností SF₆:

- nejedovatý
- inertní
- nehořlavý
- 3 až 5x lepší dielektrická pevnost než má vzduch
- asi 5x těžší než vzduch – při vdechnutí hrozí udušení
- bezbarvý
- při teplotě nad 500 °C se rozkládá a při poklesu teploty opět rekombinuje
- plnicí tlak 0,35 – 0,5 MPa
- nesmí obsahovat žádnou vlhkost – při jeho rozkladu vzniká fluorovodík, který je agresivní

Použití

Je využíván především v elektrotechnickém průmyslu jako elektrický izolátor v transformátorech. Jeho využití umožňuje jednodušší konstrukci vysoko a středně napěťových spínačů. Takto vyrobené součástky jsou potom menší, tišší a s jednodušší údržbou. Vysoká tepelná kapacita a nízká viskozita předurčuje fluorid sírový pro vysoce efektivní přenos tepelné energie.

4. Definice základních veličin transformátoru napětí

Přístrojový transformátor – transformátor určený k převodu měřené veličiny do měřicích přístrojů, elektroměrů, ochran a jiných podobných zařízení.

Transformátor napětí – přístrojový transformátor, u něhož je sekundární napětí za normálních provozních podmínek úměrné primárnímu napětí, fázový posun mezi fázory primárního a sekundárního napětí se při vhodném způsobu zapojení blíží nule.

Dvoupólově izolovaný transformátor napětí – transformátor napětí, u něhož všechny části primárního vinutí včetně svorek jsou izolovány proti zemi na izolační hladinu, která odpovídá jmenovité izolační hladině.

Jednopolově izolovaný transformátor napětí – jednofázový transformátor napětí, který má jeden konec svého primárního vinutí přímo uzemněn nebo třífázový transformátor, který je určen pro zapojení primárního vinutí do hvězdy s přímo uzemněným nulovým bodem.

Primární vinutí – vinutí, na něž se přivádí napětí, které má být transformováno.

Sekundární vinutí – vinutí, na které jsou připojeny napěťové obvody měřicích přístrojů, elektroměrů, ochran nebo podobných zařízení.

Sekundární obvod – vnější obvod, který je připojen k sekundárnímu vinutí přístrojového transformátoru.

Jmenovité primární napětí U_{1n} – efektivní hodnota primárního napětí, pro které je transformátor konstruován a které je uvedeno na štítku transformátoru.

Jmenovité sekundární napětí U_{2n} – efektivní hodnota sekundárního napětí uvedená na štítku transformátoru, odpovídající podle jmenovitého převodu transformátoru jmenovitému sekundárnímu napětí.

Toto napětí je u třífázových a dvoupólově izolovaných transformátorů 100 V nebo výjimečně 110 V a 120 V (hlavně pro export). U třífázových uzemněných a jednopolově izolovaných transformátorů pak je $100/\sqrt{3}$ V nebo $110/\sqrt{3}$ V a $120/\sqrt{3}$ V (hlavně pro export).

Jmenovité sekundární napětí pomocného vinutí jednopolově izolovaných transformátorů napětí je $100/3$ V nebo $110/3$ V a $120/3$ V (hlavně pro export).

Jmenovité napětí soustavy U_n – efektivní hodnota napětí mezi vodiči (sdružené napětí), kterým se soustava označuje a podle kterého se stanoví její provozní charakteristiky. Jmenovitému napětí soustavy většinou odpovídá jmenovité primární napětí transformátoru.

Izolační napětí transformátoru U_{li} – efektivní hodnota napětí, kterému musí v trvalém provozu vyhovět izolace přístrojového transformátoru. (Izolační napětí je většinou totožné s nejvyšším napětím soustavy.)

Nejvyšší napětí soustavy U_m – nejvyšší efektivní hodnota napětí, které se může za normálních provozních podmínek v kterékoliv době a v kterémkoliv místě soustavy vyskytnout.

Zkušební napětí střídavé U_f – efektivní hodnota střídavého napětí s kmitočtem do 200 Hz, jímž se přístrojový transformátor zkouší zpravidla 1 minutu za předepsaných atmosférických podmínek.

Zvýšené napětí U_{nm} – napětí, které musí přístrojový transformátor napětí vydržet po stanovenou dobu trvání, přičemž nesmějí být překročeny dovolené hodnoty oteplení a musí být splněny příslušné požadavky třídy přesnosti (podle ČSN EN 61869-3).

Činitel zvýšení napětí K_{nm} – činitel, jehož součin s hodnotou jmenovitého primárního napětí dává hodnotu zvýšeného napětí.

$$U_{nm} = K_{nm} \cdot U_{1n} \text{ [V; -, V]} \quad (3)$$

Břemeno transformátoru napětí Y – součet admitancí přístrojů a přívodů připojených na sekundární svorky transformátoru

$$Y = \sqrt{G^2 + B^2} \text{ [S; S, S]} \quad (4)$$

Jmenovité břemeno transformátoru napětí Y_n – admitance, kterou lze transformátor napětí v měřicím rozsahu zatížit, aniž se překročí dovolené chyby.

Zátěž transformátoru napětí P – součin břemene a čtverce jmenovitého sekundárního napětí.

$$P = Y \cdot U_{2n}^2 \text{ [VA; S, V]} \quad (5)$$

Jmenovitá zátěž transformátoru napětí P_n – je uvedena na štítku transformátoru a rovná se součinu jmenovitého břemene a čtverce jmenovitého sekundárního napětí.

$$P_n = Y_n \cdot U_{2n}^2 \text{ [VA; S, V]} \quad (6)$$

Hodnoty jmenovitých zátěží přístrojových transformátorů napětí při induktivním účinníku 0,8 jsou:

10 15 25 30 50 75 100 150 200 300 400 500 VA
Podtržené jsou přednostní.

Krajní zátěž transformátoru napětí P_{ku} – zátěž, kterou lze trvale zatížit sekundární vinutí při trvale zvýšeném napětí, přičemž chyba napětí nesmí překročit – 10 % a oteplení nesmí přesáhnout dovolenou mez.

Sekundární účinník transformátoru napětí $\cos \beta$ - poměr vodivosti a admitance břemene.

$$\cos \beta = \frac{G}{Y} \text{ [-; S, S]} \quad (7)$$

Skutečný převod - poměr skutečného primárního napětí ke skutečnému sekundárnímu napětí.

$$k_{sk} = \frac{U_{1sk}}{U_{2sk}} \text{ [-; V]} \quad (8)$$

Jmenovitý převod transformátoru napětí k_u – poměr jmenovitého primárního napětí a jmenovitého sekundárního napětí.

$$k_u = \frac{U_{1n}}{U_{2n}} [-; V] \quad (9)$$

Chyba napětí (chyba převodu) ε_u - chyba způsobená transformátorem napětí, která vyplývá z důvodu, že skutečný převod napětí není roven jmenovitému převodu. Její vyjádření je v % dáno vztahem.

$$\varepsilon_u = \frac{U_2 k_u - U_1}{U_1} \cdot 100 [\%; V; -] \quad (10)$$

Chyba napětí je kladná, je-li součin naměřené sekundární hodnoty napětí a převodu ($U_2 \cdot k_u$) větší, než skutečná (správná) primární hodnota.

Chyba úhlu transformátoru napětí δ_u – fázový rozdíl mezi fázory primárního a sekundárního napětí, směr fázoru je volen tak, že u ideálního transformátoru napětí je chyba úhlu nulová.

Měřicí rozsah – rozsah primárních hodnot transformované veličiny, pro který jsou stanoveny dovolené hodnoty chyb a dovolené oteplení.

Jistíci rozsah - rozsah primárních hodnot transformované veličiny, pro který jsou stanoveny hodnoty chyb pro účely jistění.

Třída přesnosti T_p – označení přidělené přístrojovému transformátoru proudu nebo napětí, které určuje jeho největší dovolené chyby při předepsaných podmínkách provozu.

Třídy přesnosti měřicích transformátorů napětí

Podle dovolených chyb se měřicí transformátory napětí s ohledem na použití zařazují do tříd přesnosti T_p : 0,1; 0,2; 0,5; 1; 3

Dovolené chyby měřicích transformátorů napětí

Chyba napětí a chyba úhlu měřicích transformátorů napětí tříd přesnosti 0,1; 0,2; 0,5; 1; 3 v rozsahu 25 % až 100 % jmenovitého břemene, při induktivním účinníku $\cos\beta = 0,8$, při napětí v rozmezí 80 až 120 % napětí jmenovitého a při jmenovitém kmitočtu nesmějí přesáhnout hodnoty uvedené v tabulce 2. Chyby musí být stanoveny na svorkách transformátoru a musí zahrnovat vliv pojistek nebo rezistorů, které jsou součástí transformátoru.

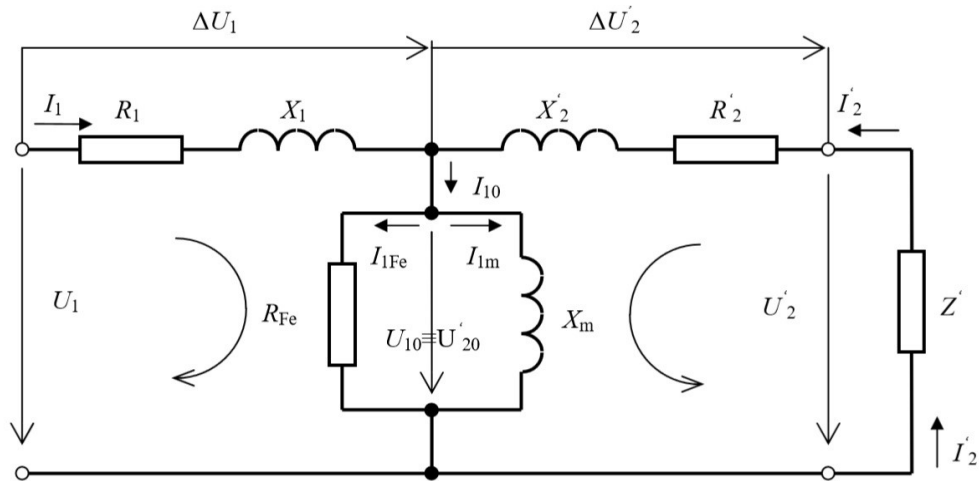
Tabulka 2 - Dovolené chyby měřicích transformátorů napětí [5]

Třídy přesnosti měřicích transformátorů napětí T_p	Dovolené chyby napětí ε_u a úhlu δ_u	
	Měřicí rozsah 80 % až 100 % U_{1n}	
	$\pm \varepsilon_u$	$\pm \delta_u$
	[%]	[min]
0,1	0,1	5
0,2	0,2	10
0,5	0,5	20
1	1,0	40
3	3,0	není omezena

Jestliže je však u transformátorů napětí 25% jmenovité zátěže větší než 15 VA, musí být chyby v dovolených mezích podle tabulky již od zátěže 15 VA. [5]

5. Náhradní schéma a fázorový diagram

Náhradní schéma i fázorový diagram u přístrojových transformátorů napětí jsou v podstatě stejné jako u běžných transformátorů, viz obrázek 4. Pro sledování velikosti chyb u přístrojových transformátorů je nejdůležitější úbytková část diagramu při zachování skutečných směrů proudů a napětí. [5]



Obrázek 4 - Náhradní schéma transformátoru napětí [5]

Jak je patrné z náhradního schématu obrázku 4, pro jednotlivé obvody platí

$$\bar{U}_1 = R_1 \bar{I}_1 + jX_1 \bar{I}_1 + \bar{U}_{10} \quad (11)$$

$$\bar{U}'_1 = R'_2 \bar{I}_2 + jX'_2 \bar{I}_2 + \bar{U}'_{20} \quad (12)$$

Vzhledem k tomu, že platí

$$\bar{U}_{10} \equiv \bar{U}'_{20} \quad (13)$$

$$\bar{I}_1 = \bar{I}_{10} - \bar{I}_2 \quad (14)$$

postupnou úpravou vztahů (11), (12) a (13) obdržíme

$$\bar{U}_1 - R_1 \bar{I}_1 - jX_1 \bar{I}_1 = \bar{U}'_2 - R'_2 \bar{I}_2 - jX'_2 \bar{I}_2 \quad (15)$$

$$\bar{U}_1 = \bar{U}'_2 + (R_1 + jX_1) \bar{I}_1 + (R'_2 + jX'_2)(-\bar{I}_2) \quad (16)$$

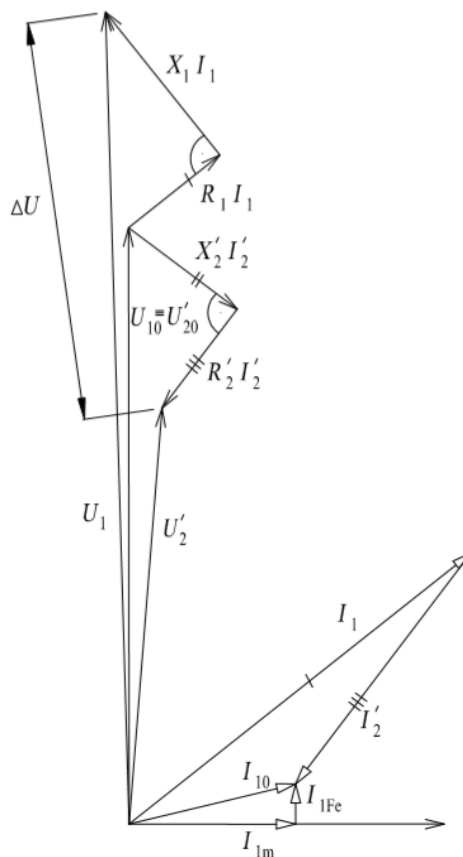
úpravou (14) a (16) dostaneme:

$$\bar{U}_1 = \bar{U}'_2 + (R_1 + jX_1) \bar{I}_{10} + (R_1 + R'_2 + jX_1 + jX'_2)(-\bar{I}_2) \quad (17)$$

5.1. Fázorový diagram

Fázorový diagram představuje grafické zobrazení předcházejících vztahů (rovníc), jak je patrné na obrázku 5. Pro napětí U_1 z náhradního schématu vyplývá:

$$\bar{U}_1 = \bar{U}_2' + \Delta\bar{U}_1 + \Delta\bar{U}_2 \quad (18)$$

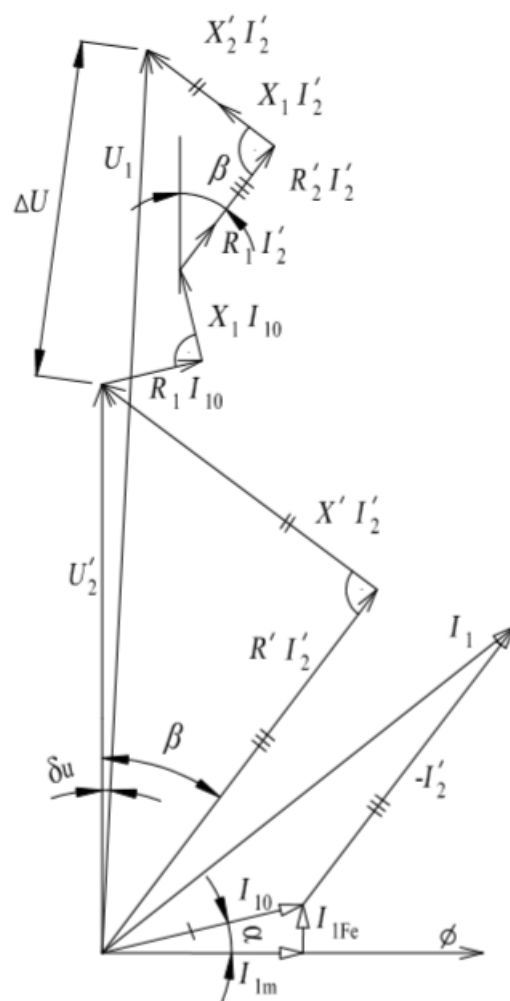


Obrázek 5 - Fázorový diagram napětového transformátoru [5]

Napětí U_1 u napětového transformátoru je vlastně napětí na vstupních svorkách transformátoru a skládá se z úbytku na primárním vinutí, sekundárním vinutí a z napětí na vnějším břemeni Z .

Při kreslení fázorového diagramu vyjdeme od fázoru U_2' a položíme ho do svislé osy. Fázor magnetického toku budeme uvažovat kolmý na fázor U_2' . Dopustíme se přitom jen malé nepřesnosti, protože mezi fázorem U_2' a U_{20}' bývá velice malý úhel.

Při vyhodnocování chyb transformátoru napětí si budeme všimnout hlavně horní části fázorového diagramu, tj. fázoru úbytku napětí ΔU a jeho složek, viz obrázek 6. [5]



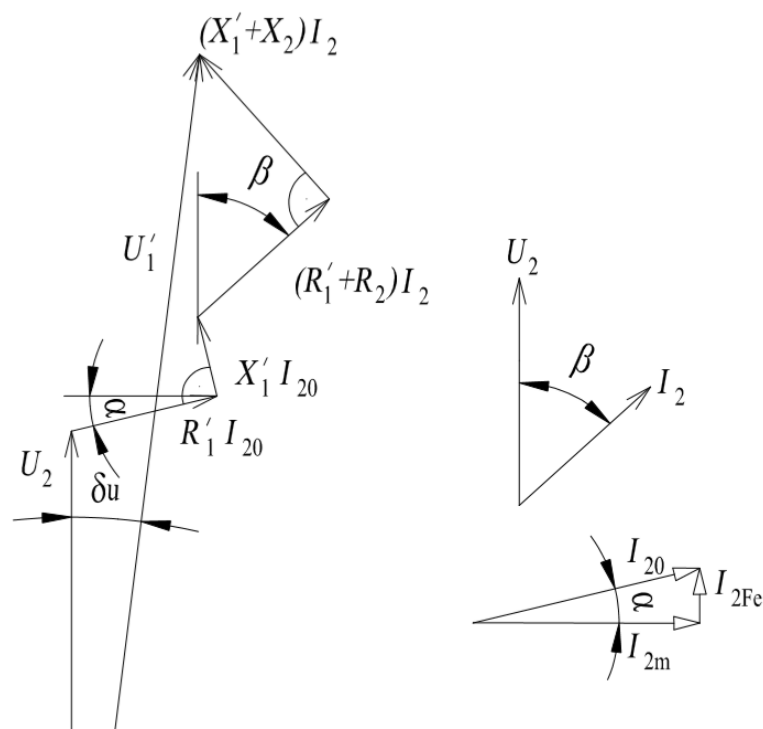
Obrázek 6 - Pootočený fázorový diagram napětového transformátoru [5]

Při další úpravě kreslení budeme kreslit pouze úbytkovou část fázorového diagramu s tím, že jako výchozí fázor budeme brát fázor U_2 a s měnícím se zatížením se bude měnit fázor U_1 . Jelikož sekundární napětí budeme uvažovat jako výchozí veličinu, je pak výhodné užívat hodnot primárního napětí, proudu a impedance, případně vodivosti, přepočtených na sekundární počet závitů (obrázek 7). Proud I_{20} je pak proud naprázdno, přepočtený na sekundární počet závitů ($= I_{10}$).

Přepočty:

$$U_1' = U_1 \frac{N_2}{N_1}; U_1 I_1 = U_1' I_1' \quad (19)$$

$$I_1' = I_1 \frac{N_1}{N_2}; R_1' = R_1 \left(\frac{N_2}{N_1} \right)^2 \quad (20)$$

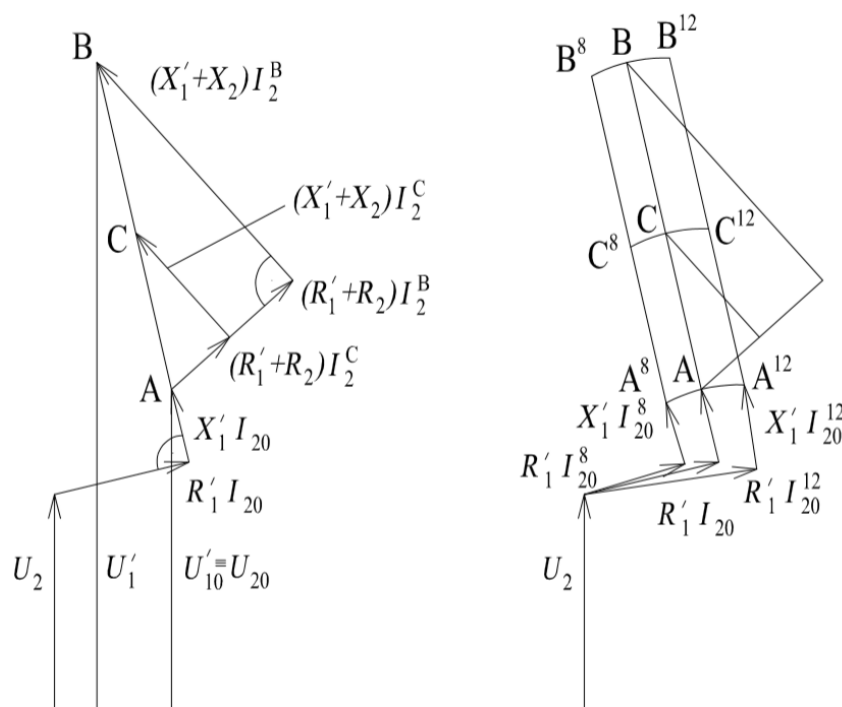


Obrázek 7 - Fázorový diagram s úbytkovou částí přepočtený na sekundární závity [5]

Vzhledem k tomu, že úhel δ_u bývá u přístrojových transformátorů napětí velmi malý, (viz tabulka 1), můžeme fázory U_1' a U_2' kreslit jako rovnoběžné. Tedy bez podstatného vlivu na přesnost vyhodnocování chyb napět'ového transformátoru. Sledujme nyní, jak se bude měnit poloha koncového bodu fázoru U_1' se změnou zátěže na sekundárních svorkách transformátoru a změnou napětí U_1 .

Při změně zátěže se bude koncový bod fázoru U_1' pohybovat po úsečce AB, přičemž bod B odpovídá jmenovité zátěži a bod A stavu naprázdno (úbytek od proudu I_2 je roven nule). Bod C pak odpovídá obecné zátěži, viz obrázek 8 vlevo.

Když budeme navíc ještě uvažovat změnu napětí U_1 , bude se koncový bod fázoru U_1' při jednotlivých zátěžích pohybovat způsobem, jak je znázorněno na obrázek 8 vpravo. Přičemž body A12, B12, C12 odpovídají zvýšení napětí U_1 na 120 % a body A8, B8, C8 odpovídají jeho snížení na 80 %. Tuto změnu polohy koncového bodu fázoru U_1' lze vysvětlit odpovídající změnou fázoru I_{20} , čili změnou magnetické indukce v magnetickém obvodu. [5]

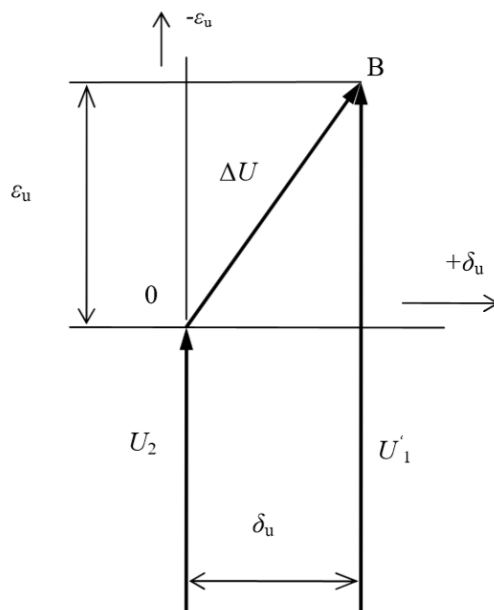


Obrázek 8 - Fázorový diagram pro změnu zátěže a pro změnu napětí U_1 [5]

5.2. Chyby transformátoru napětí a diagramy chyb

Jak je uvedeno v kapitole 5.1. Fázorový diagram, budeme se zabývat jen horní částí fázorového diagramu tj. úbytky napětí na jednotlivých složkách impedance přístrojového transformátoru. Za počátek souřadnicové soustavy budeme považovat koncový bod fázoru U_2 . Fázorový rozdíl mezi fázory U_1' a U_2 označíme jako fázorovou chybu ΔU .

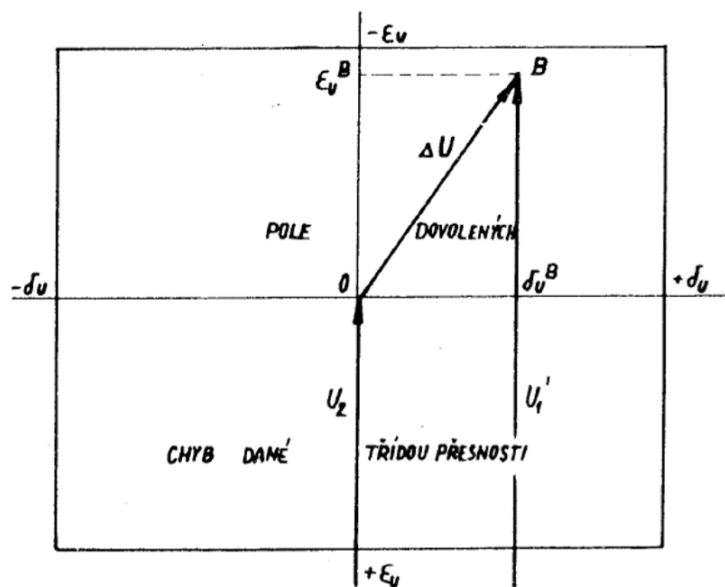
Takto vyjádřená fázorová chyba nemá pro nás praktický význam, a proto ji rozložíme na dvě na sebe kolmé složky, pomocí kterých určíme chybu napětí ε_u a chybu úhlu δ_u . Jak je uvedeno v tabulce 2 u δ_u , jedná se o velmi malé chyby úhlu. Pak fázory U_1 a U_1' můžeme považovat za rovnoběžné a oblouk se středem v počátku fázoru U_2 o poloměru U_2 můžeme nahradit přímkou. Fázorovou chybu napětí ΔU takto bez podstatného vlivu na přesnost vyhodnocování rozkládáme na složky ε_u a δ_u , přičemž ε_u představuje chybu napětí a δ_u chybu úhlu, kterou však musíme vyjádřit v minutách (viz obrázek 9). Převod chyby úhlu δ_u vyjádřené v procentech na vyjádření v minutách objasníme v následující kapitole 5.3. [5]



Obrázek 9 - Základ pro vytvoření komplexního diagramu chyb [5]

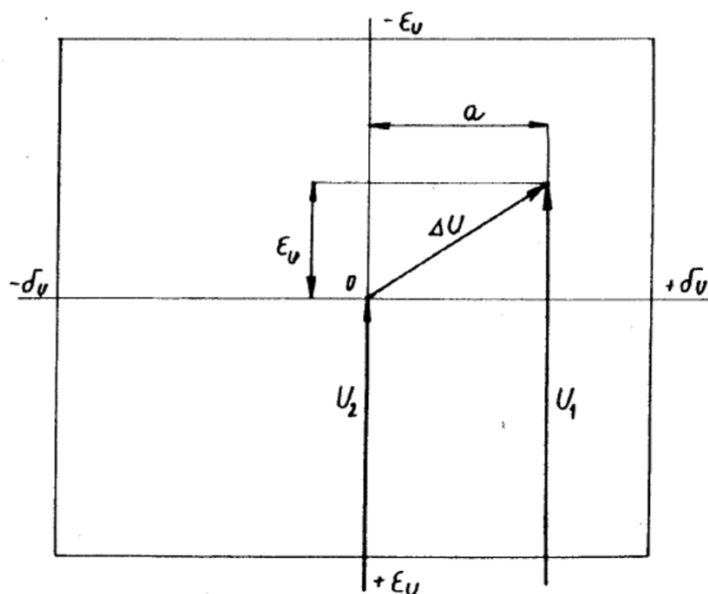
5.3. Komplexní diagram chyb a pole dovolených chyb

Komplexní diagram chyb transformátoru napětí vyjadřuje současně chybu napětí i chybu úhlu. Jestliže na příslušné osy vyneseme hranice chyb podle dané třídy přesnosti, dostáváme dovolené pole chyb v komplexním diagramu chyb. Koncový bod fázoru U_1' se tedy musí pohybovat uvnitř tohoto pole chyb. Viz obrázek 10.



Obrázek 10 - Komplexní diagram chyb [5]

Předpokládáme, že fázory jsou vyneseny v %, musíme tedy chybu úhlu přepočítat na minuty. Viz obrázek 11.



Obrázek 11 - Převod na minuty [5]

a – fázor ΔU v % promítnutý do vodorovné osy. Tuto vzdálenost vyjádříme v minutách (jako úhel δ_U)

Pro úhel $\bar{\delta}_U$ pak platí

$$\operatorname{tg} \delta_U = \frac{a}{100} \cong \frac{\bar{\delta}_U}{100} \quad (21)$$

Při $U_2 = 100 \%$

Pro uvažované velikosti úhlu pak můžeme psát

$$a \doteq \bar{\delta}_U \quad (22)$$

Pak

$$\bar{\delta}_U = \frac{\pi}{180 \cdot 60} \delta_U [\%; \text{min}] \quad (23)$$

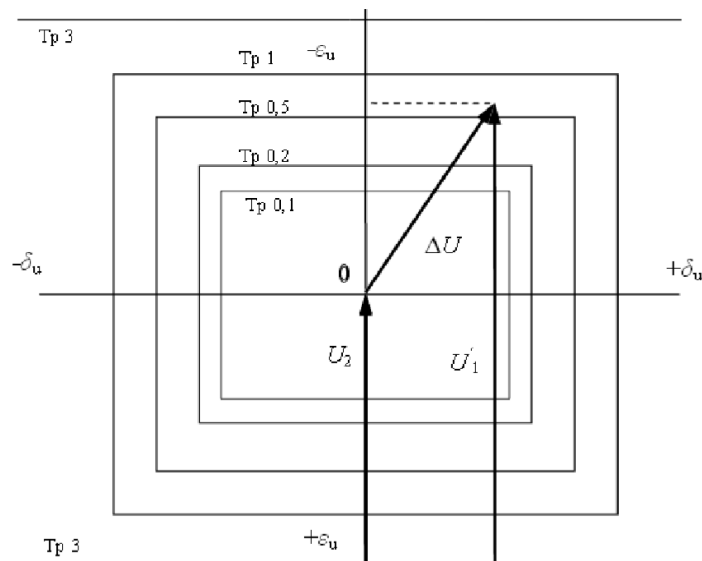
Potom platí

$$a \cong \bar{\delta}_U = 0,0291 \cdot \delta_U [\%; \text{min}] \quad (24)$$

Naopak pokud máme „a“ [%] přepočítat na δ_U [min]

$$\delta_U = 34,4 \cdot a [\text{min}; \%;] \quad (25)$$

Obdélník na obrázku 12 vyjadřuje pole dovolených chyb daných třídou přesnosti. Při zahrnutí všech tříd přesnosti pak dostaneme kompletní komplexní diagram chyb se všemi mezemi danými třídami přesnosti a v případě zjištění, že nám některý kontrolovaný napěťový transformátor nevyhovuje požadované třídě přesnosti, může být přerazen do nižší třídy přesnosti.

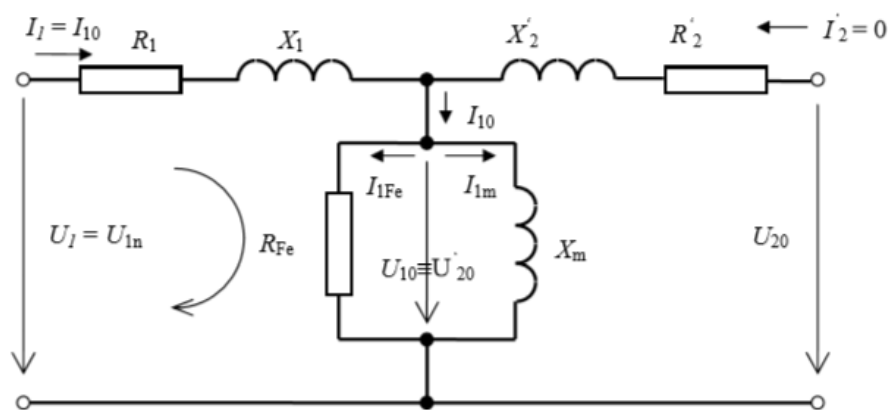


Obrázek 12 – Kompletní komplexní diagram chyb pro všechny třídy přesnosti

5.4. Chod transformátoru naprázdno

Při stavu naprázdno transformátor napětí dosáhne nejmenší chyby. Prvky, které ovlivňují výslednou chybu přístrojového transformátoru napětí, jsou: břemeno, napětí, kmitočet a sekundární účinník, viz odstavec 5.5.

Tento stav nastane při rozpojených svorkách výstupního vinutí, kdy proud $I_2 = I_2' = 0$. Na vstupu je nastavena jmenovitá hodnota vstupního napětí $U_1 = U_{1N}$ a odečteme vstupní proud $I_1 = I_{10}$, příkon P_0 a napětí U_{20} . Příkon naprázdno představuje ztráty transformátoru v železe $\Delta P_0 = \Delta P_{Fe}$. Stav naprázdno je zobrazen ve zjednodušeném náhradním schématu na obrázku 13.



Obrázek 13 – Schéma transformátoru při stavu naprázdno

Pro schéma na obrázku 13 platí

$$\bar{U}_1 = R_1 \bar{I}_{10} + jX_1 \bar{I}_{10} + \bar{U}_{10} \quad (26)$$

Kde $R_1 I_{10}$ je úbytek napětí na činném odporu vinutí
 $X_1 I_{10}$ je úbytek napětí na rozptylové reaktanci primárního vinutí

Platí i vztah (13)

Napětí U_{10} je v podstatě indukované od společného toku a pro jeho velikost platí

$$U_{10} = 4,44f\phi N_1 \quad (27)$$

U skutečného transformátoru musíme ještě uvažovat ztráty v železe ΔP_{Fe} , které si nahradíme ztrátami v ekvivalentním činném odporu

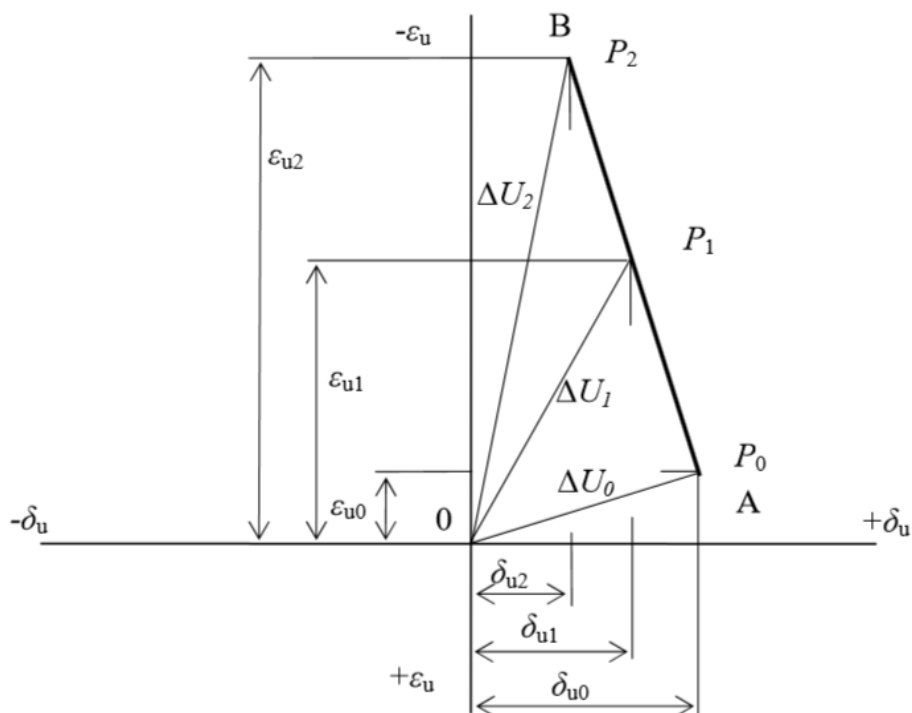
$$R_{Fe} = \frac{U_{10}^2}{\Delta P_{Fe}} \quad (28)$$

Pokud bychom zanedbali ztráty v železe, pak by měl proud naprázdno čistě induktivní charakter. [6]

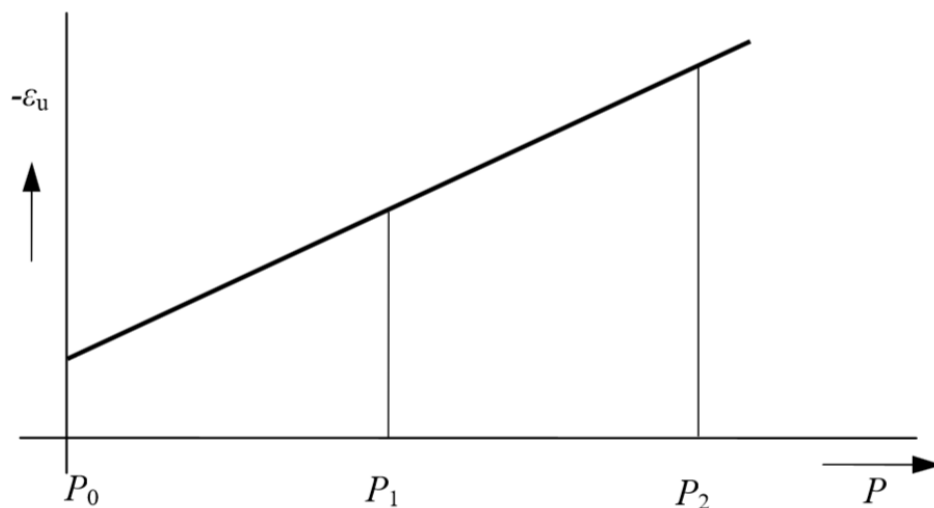
5.5. Závislosti chyb na jednotlivých veličinách

a) Závislost na břemeni (zátěži)

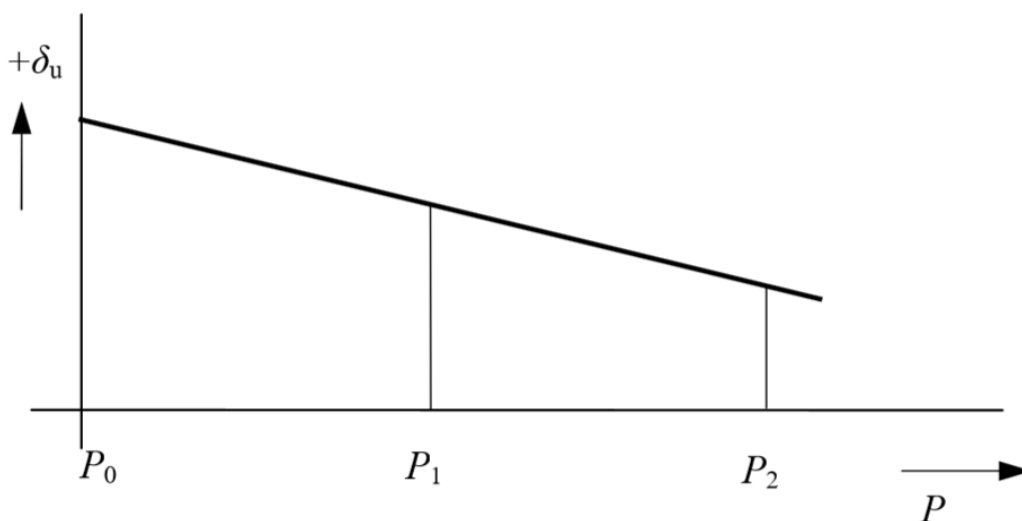
Úsečka AB je vlastně přeponou v trojúhelníku úbytku napětí od proudu I_2 a lze na ni přímo vynést stupnici zátěže nebo břemene. Obrázek 14 znázorňuje závislost chyb na břemeni v komplexním diagramu chyb, na obrázku 15 závislost chyby na břemeni a obrázek 16 závislost úhlu na břemenu. [5]



Obrázek 14 – Závislost chyb na břemeni v komplexním diagramu [5]



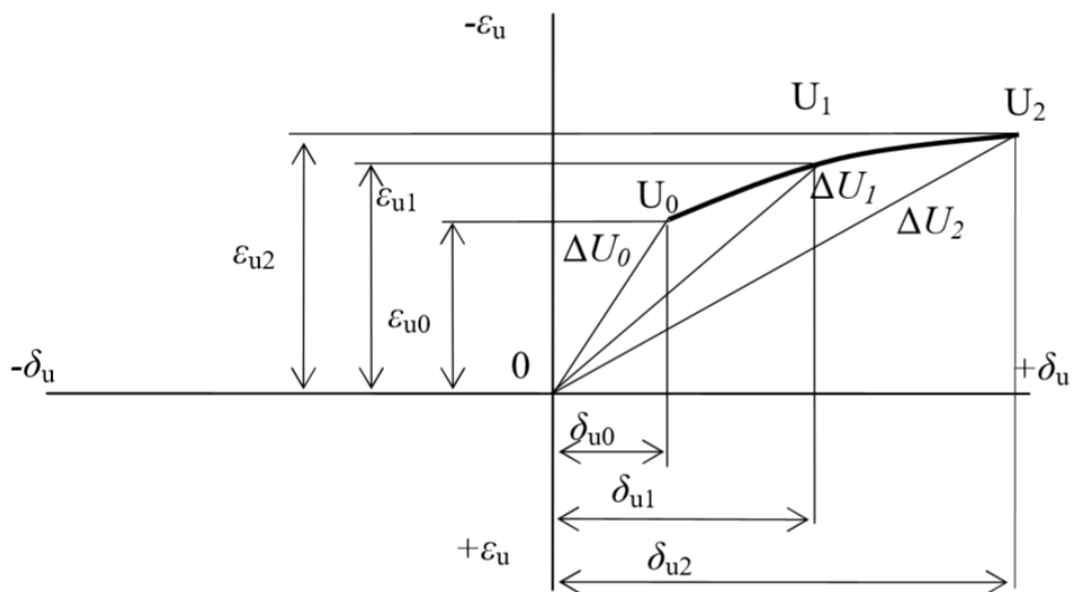
Obrázek 15 – Závislost chyb napětí na břemeni [5]



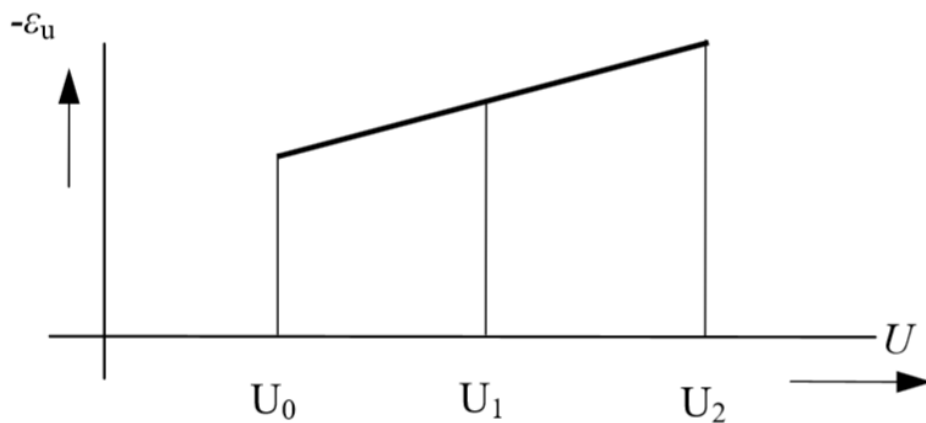
Obrázek 16 – Závislost chyb úhlu na břemeni [5]

b) Závislost na napětí (Viz obrázek 17)

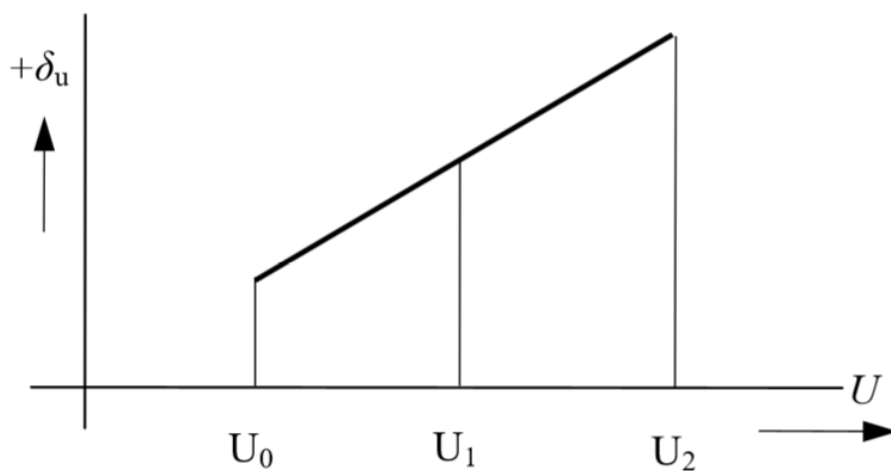
Závislosti v obrázcích 18 a 19 mají charakter přímky, pokud se příslušné pracovní body nachází v lineární části magnetizační charakteristiky. Jestliže se dostaneme do oblasti vyšších magnetických indukcí (blízko „kolena“), dochází k zakřivení těchto závislostí. [5]



Obrázek 17 – Závislost chyb na napětí v komplexním diagramu [5]



Obrázek 18 - Závislost chyby napětí na napětí [5]



Obrázek 19 – Závislost chyby úhlu na napětí [5]

c) Závislost na kmitočtu

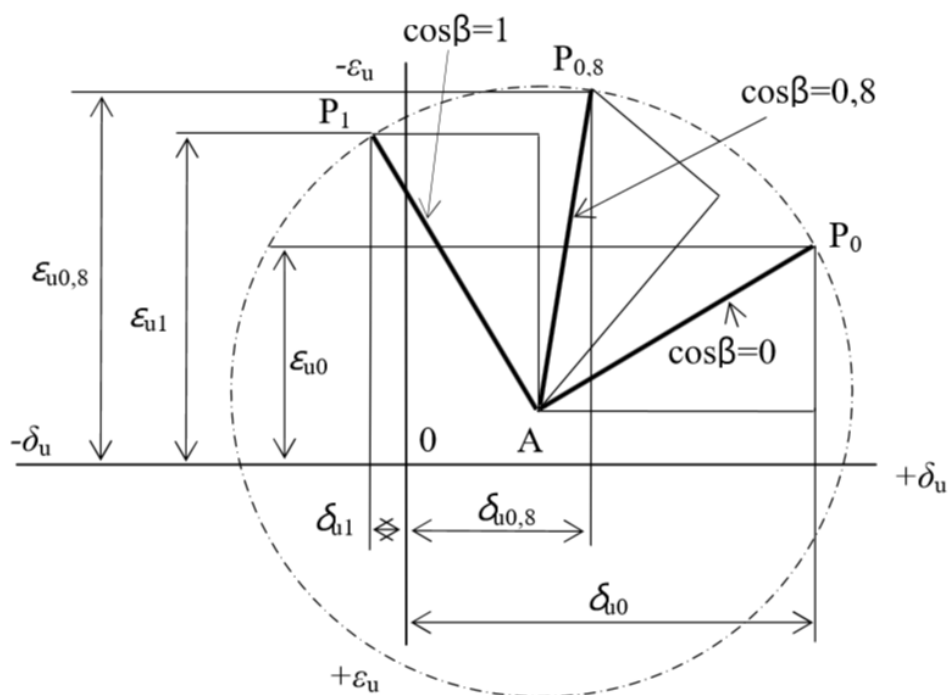
Při trvalém přizpůsobení transformátoru na jiný kmitočet se u něj musí změnit počet závitů nepřímo úměrně s kmitočtem, aby magnetická indukce zůstala konstantní. Rozptylová reaktance se mění s kmitočtem, protože platí vztah

$$X = 2\pi fL [\Omega] \quad (29)$$

Jinak je třeba každou změnu kmitočtu posuzovat případ od případu, protože se změnou kmitočtu dochází ke změně magnetizačního příkonu železa a ke změně činných ztrát v železe. [5]

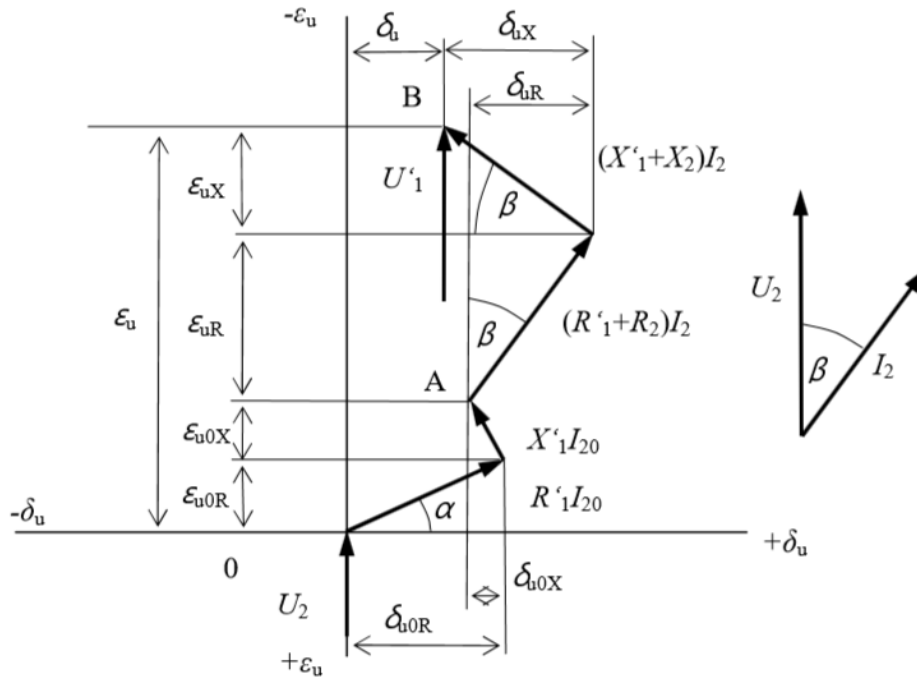
d) Závislost na sekundárním účinníku $\cos\beta$

Tuto závislost si můžeme představit tak, že bod naprázdno „A“ zůstává na místě a natáčí se vlastně zatěžovací trojúhelník (trojúhelník úbytků napětí od proudu I_2). Koncový bod opisuje kružnici se středem v bodu A. [5]. Jak je vidno na obrázku 20.



Obrázek 20 – Závislost chyb na sekundárním účinníku v komplexním diagramu [5]

5.6. Výpočet chyb a jejich složek



Obrázek 21 – Zobrazení chyby napětí, chyby úhlu a jejich složek [5]

Chyba napětí způsobená zatěžováním proudem I_2

$$\varepsilon_{uR} = \frac{100}{U_2} (R'_1 + R_2) I_2 \cos \beta \text{ [%; V, } \Omega, \text{ A, } ^\circ] \quad (30)$$

$$\varepsilon_{uR} = \frac{100}{U_2} (R'_1 + R_2) I_2 \cos \beta \text{ [%; V, } \Omega, \text{ A, } ^\circ] \quad (31)$$

Chyba napětí způsobená proudem naprázdno

$$\varepsilon_{u0R} = \frac{100}{U_2} R'_1 I_{20} \sin \alpha = \frac{100}{U_2} R'_1 I_{2Fe} \text{ [%; V, } \Omega, \text{ A, } ^\circ] \quad (32)$$

$$\varepsilon_{u0X} = \frac{100}{U_2} X'_1 I_{20} \cos \alpha = \frac{100}{U_2} X'_1 I_{2m} \text{ [%; V, } \Omega, \text{ A, } ^\circ] \quad (33)$$

Úhel α je úhel mezi budícím proudem a jeho magnetizační složkou (obr. 7 nebo obr. 21).

Chyba úhlu způsobená zatěžovacím proudem I_2

$$\delta_{uR} = \frac{3440}{U_2} (R'_1 + R_2) I_2 \sin \beta \text{ [min; V, } \Omega, \text{ A, } ^\circ] \quad (34)$$

$$\delta_{uX} = \frac{3440}{U_2} (X'_1 + X_2) I_2 \cos (180 - \beta) \text{ [min; V, } \Omega, \text{ A, } ^\circ] \quad (35)$$

Chyba úhlu způsobená proudem naprázdno

$$\delta_{u0R} = \frac{3440}{U_2} R_1' I_{20} \cos \alpha = \frac{3440}{U_2} R_1' I_{2m} \text{ [min; V, } \Omega, \text{ A, } ^\circ] \quad (36)$$

$$\delta_{u0X} = \frac{3440}{U_2} X_1' I_{20} \cos(90 + \alpha) = \frac{3440}{U_2} X_1' (-I_{2Fe}) \text{ [min; V, } \Omega, \text{ A, } ^\circ] \quad (377)$$

Výsledná chyba napětí pak bude

$$\varepsilon_u = \varepsilon_{u0R} + \varepsilon_{u0X} + \varepsilon_{uR} + \varepsilon_{uX} \text{ [%; \%]} \quad (38)$$

Podobně výsledná chyba úhlu

$$\delta_u = \delta_{u0R} + \delta_{u0X} + \delta_{uR} + \delta_{uX} \text{ [min; min]} \quad (39)$$

Poznámka: ve vztahu (39) budou mít složky δ_{u0X} a δ_{uX} ve většině případů záporné znaménko (obrázek 21).

Pro další výklad zavedeme pojem průchozího odporu

$$R = R_1' + R_2 \text{ } [\Omega; \Omega] \quad (40)$$

průchozí reaktance

$$X = X_1' + X_2 \text{ } [\Omega; \Omega] \quad (41)$$

a průchozí impedance

$$\bar{Z} = R + jX \text{ } [\Omega; \Omega, \Omega] \quad (42)$$

Z odvození jednotlivých složek chyb můžeme posoudit, které veličiny mají vliv na velikost chyb transformátoru napětí. Vidíme, že na velikost chyby napětí má podstatný vliv hodnota složek průchozí impedance a na chybu úhlu pak na prvním místě hodnota magnetické indukce (závisí na ní proud naprázdno) a na druhém místě průchozí impedance. [5]

5.7. Úprava chyb – závitová korekce

Transformátor napětí, jehož závitový převod se rovná převodu jmenovitému, využívá svým polem skutečných chyb napětí jen zápornou polovinu pole dovolených chyb napětí. Prakticky by to znamenalo nevyužitý magnetický obvod navrženého transformátoru napětí a tudíž jeho neekonomické provedení. Využití pole dovolených chyb se zlepší posunutím pole skutečných chyb v poli dovolených chyb tak, aby se obsáhla i kladná polovina pole dovolených chyb napětí. Proto je nutné upravit počty závitů napěťového transformátoru tak, abychom dosáhli takového zvýšení sekundárního napětí, aby chyba při nejmenší požadované zátěži byla kladná a co nejbližší hranici dovoleného pole chyb pro požadovanou třídu přesnosti transformátoru. Toto zvýšení sekundárního napětí transformátoru dosáhneme buď zvýšením počtu závitů sekundárního vinutí, nebo častěji z důvodu

jemnosti prováděné korekce snížením počtu závitů na primárním vinutí. Jestliže tedy požadujeme posunutí chyb o v [%], pak velikost závitové korekce je

$$\Delta N^k = N \cdot \frac{v}{100} [-] \quad (43)$$

$$N^k = N \pm \Delta N^k [-] \quad (44)$$

N - je původní počet závitů vinutí, na kterém chceme provádět korekci,

N^k - je nový počet závitů vinutí po korekci,

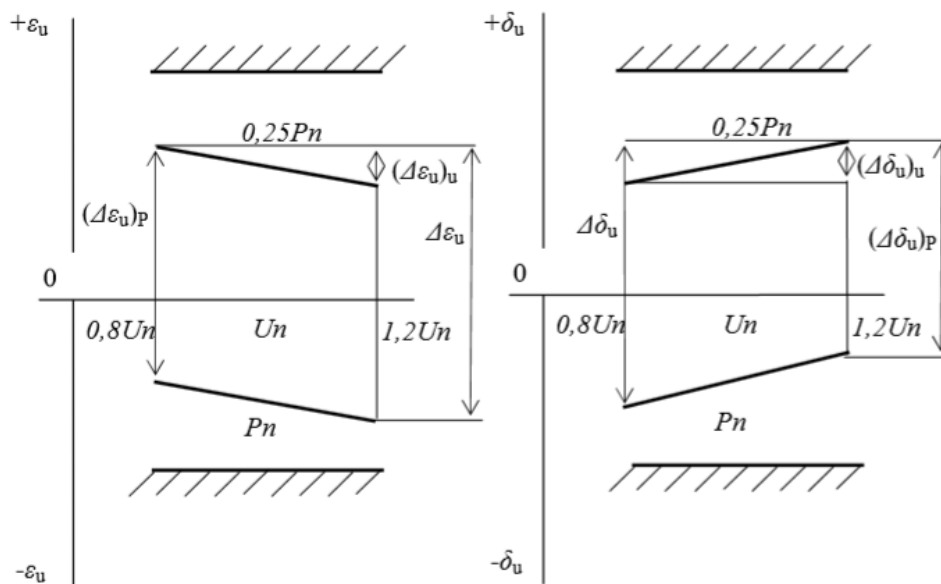
ΔN^k - je závitová korekce (počet závitů o které změníme původní počet závitů N),

v - je procentní velikost závitové korekce a \pm znaménko je kladné při korekci závitů sekundárního vinutí (zvětšení počtu závitů) a záporné při korekci primárního vinutí (zmenšení počtu závitů) transformátoru napětí. [5]

5.8. Rozpětí chyb

Celkové rozpětí chyb značíme obecně $\Delta \varepsilon_U$ a $\Delta \delta_U$. Pokud uvažujeme rozpětí chyb podle určitého parametru, pak připojíme příslušný index podle zátěže $(\Delta \varepsilon_U)_p$, podle napětí $(\Delta \varepsilon_U)_u$. Jak lze vidět na obrázku 22.

Podobně je tomu u rozpětí chyby úhlu. [5]



Obrázek 22 - Rozpětí chyb [5]

5.9. Výpočet průchozí impedance a jejich složek z komplexního diagramu chyb

Z komplexního diagramu chyb můžeme určit průchozí impedanci, případně její složky. Toto potřebujeme například při přepočítávání odporu vinutí tak, aby transformátor vyhovoval jiné třídě přesnosti. [5]

Úbytek na průchozím odporu pro zátěž P_B vyjádřený v % (obrázek 23)

$$\varepsilon_{RB} = \frac{RI_{2B}}{U_2} \cdot 100 [\%; \Omega, A, V] \quad (45)$$

Sekundární proud

$$I_{2B} = \frac{P_B}{U_2} [A, VA, V] \quad (46)$$

Pak

$$\varepsilon_{RB} = R \frac{P_B}{U_2^2} \cdot 100 [\%; \Omega, VA, V] \quad (47)$$

Podobně pro výkon v bodu C ($0,25 \cdot P_n$)

$$\varepsilon_{RC} = R \frac{P_C}{U_2^2} \cdot 100 [\%; \Omega, VA, V] \quad (48)$$

Rozdíl obou úbytku napětí

$$\varepsilon_{RB} - \varepsilon_{RC} = R \frac{P_B}{U_2^2} (P_B - P_C) [\%; \Omega, VA, V] \quad (49)$$

Tento rozdíl můžeme lehce odečíst z komplexního diagramu. Pak průchozí odpor

$$R = \frac{\varepsilon_{RB} - \varepsilon_{RC}}{100} \cdot \frac{U_2^2}{P_B - P_C} [\%; \Omega, VA, V] \quad (50)$$

Podobně průchozí reaktance

$$X = \frac{\varepsilon_{RB} - \varepsilon_{RC}}{100} \cdot \frac{U_2^2}{P_B - P_C} [\%; \Omega, VA, V] \quad (51)$$

Z komplexního diagramu chyb transformátoru napětí získáme přehled o využití dovoleného pole chyb v dané třídě přesnosti. Jak si ukážeme dále, můžeme také pomocí komplexního diagramu chyb snadno určit odpor vedení, kterým můžeme danou zátěž připojit na svorky transformátoru. Toto je důležité např. v rozvodnách a v místech, kde je zátěž ve větší vzdálenosti od transformátoru. [5]

Pro tento výpočet budeme předpokládat, že vedení má pouze činný odpor a že se tedy v komplexním diagramu zvětší jen složka ε_R .



A – chyby při stavu naprázdno

The diagram shows a rectangular element in a coordinate system where the horizontal axis is labeled $-\delta_u$ and the vertical axis is labeled $+\epsilon_u$. The origin is marked with a '0'. A vector I_2 originates from the origin and points towards point B, making an angle β with the horizontal axis. Point B is located at the top-right corner of the rectangle. A dashed line connects point C (bottom-left corner) to point B'. Point B' is located outside the rectangle, further up and to the right. A solid line segment connects point C to point B. A dashed line segment connects point C to point B'. A double-headed arrow labeled $\Delta \epsilon_R$ indicates the distance between two parallel lines passing through points B and B'. Another double-headed arrow labeled $\epsilon_{XB} = \epsilon_{XB'}$ indicates the distance between two other parallel lines. An angle is shown at point B' between a line extending from B and another line.

Obrázek 24 – Změna složky ε_R po započítání činného odporu [5]

Platí

$$\varepsilon_{RB'} = \varepsilon_{RB} + \Delta\varepsilon_R [\%] \quad (52)$$

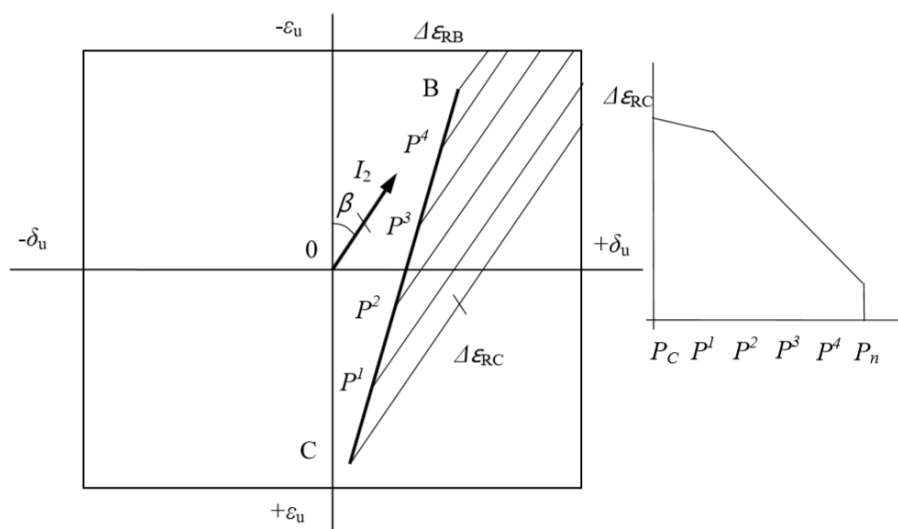
Kde $\Delta\varepsilon_R$ odečteme v % z komplexního diagramu.

Pro odpor připojovacího vodiče pak platí

$$R_V = \frac{\Delta \varepsilon_R \cdot U_2^2}{100 \cdot P_B} [\%; \Omega, V, VA] \quad (53)$$

Při odečítání velikosti $\Delta \varepsilon_R$ je třeba uvažovat jistou rezervu v chybách, vzhledem k určitému rozptylu v měření chyb.

Pro ostatní zátěže si určíme dovolené úbytky $\Delta \varepsilon_R$ podle obrázku 25. Z těchto úbytků můžeme vynést i závislost $\Delta \varepsilon_R = f(P)$. [5]



Obrázek 25 – Závislost dovolených úbytků na zátěži [5]

6. Výpočet transformátoru

Zadané hodnoty:

$$U_{1n} = 110 \text{ kV}$$

$$U_{2n} = 100 \text{ V}$$

$$P_n = 25 \text{ VA}$$

Třída přesnosti: 0,5 %

Izolační médium SF₆

6.1. Návrh magnetického obvodu transformátoru

Jádro je navinuto z orientovaného plechu Eo 11 tloušťky 0,35 mm. Průřez jádra volím pětistupňový.

Magnetickou indukci jsem určil tak, aby transformátor pracoval v lineární části magnetizační charakteristiky.

Volím: $B_n = 0,7 \text{ T}$

N_e je počet závitů na 1 V - volím $N_e = 1 \text{ závit/V}$

Průřez jádra

$$S_{Fe} = \frac{1}{\sqrt{3} \cdot 4,44 \cdot f \cdot B_n \cdot N_e} = \frac{1}{\sqrt{3} \cdot 4,44 \cdot 50 \cdot 0,7 \cdot 1} = 3,72 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2 \quad (54)$$

Skutečný průřez jádra

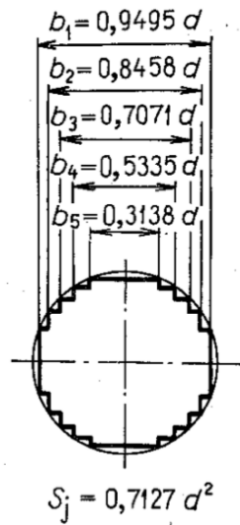
$$S_i = \frac{S_{Fe}}{\xi} = \frac{3,72 \cdot 10^{-3}}{0,93} = 4 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2 \quad (55)$$

ξ – činitel plnění (0,92 – 0,95)

Počet stupňů jádra je 5 \rightarrow činitel $k_0 = 0,7127$ (Obrázek 26)

Průměr kružnice opsané kolem jádra

$$d = \sqrt{\frac{S_i}{k_0}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 10^{-3}}{0,7127}} = 74,92 \cdot 10^{-3} \text{ m} \quad (56)$$



Obrázek 26 – Odstupňované jádro[6]

Rozměry jednotlivých stupňů:

$$b_1 = 0,9495 \cdot d = 0,9495 \cdot 74,92 \cdot 10^{-3} = 71,14 \cdot 10^{-3} m \quad (57)$$

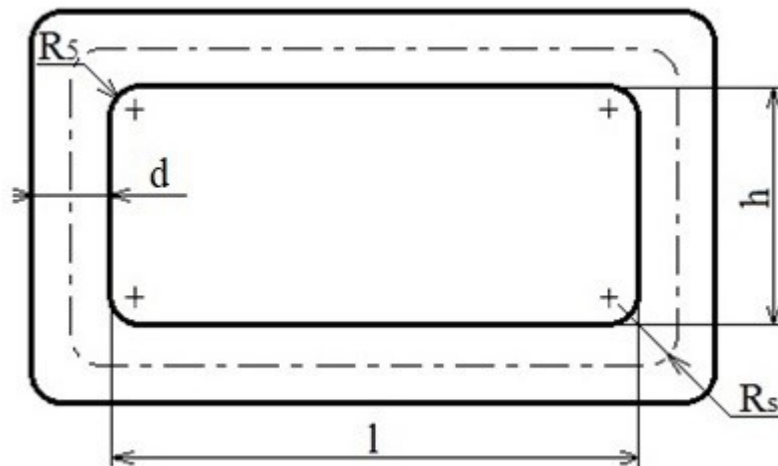
$$b_2 = 0,8458 \cdot d = 0,8458 \cdot 74,92 \cdot 10^{-3} = 63,37 \cdot 10^{-3} m \quad (58)$$

$$b_3 = 0,7071 \cdot d = 0,7071 \cdot 74,92 \cdot 10^{-3} = 52,98 \cdot 10^{-3} m \quad (59)$$

$$b_4 = 0,5335 \cdot d = 0,5335 \cdot 74,92 \cdot 10^{-3} = 39,97 \cdot 10^{-3} m \quad (60)$$

$$b_5 = 0,3138 \cdot d = 0,3138 \cdot 74,92 \cdot 10^{-3} = 23,51 \cdot 10^{-3} m \quad (61)$$

Řez magnetickým obvodem



Obrázek 27 - Magnetický obvod transformátoru

$$R_s = \left(\frac{d}{2} + R_5 \right) = \left(\frac{74,92 \cdot 10^{-3}}{2} + 0,005 \right) = 42,46 \cdot 10^{-3} m \quad (62)$$

$l = 0,15 \text{ m}$
 $h = 0,13 \text{ m}$ (Obrázek 27)

Délka střední siločáry

$$l_{Fe} = 2 \cdot (l + h) + 2\pi \cdot R_s = 2 \cdot (0,15 - 0,01 + 0,13 - 0,01) + 2\pi \cdot 42,46 \cdot 10^{-3} = 0,787 \text{ m} \quad (63)$$

Měrná hmotnost Eo 11: $\gamma_{Fe} = 7650 \text{ kg/m}^3$

Hmotnost jádra transformátoru

$$m_{Fe} = S_{Fe} \cdot l_{Fe} \cdot \gamma_{Fe} = 3,72 \cdot 10^{-3} \cdot 0,787 \cdot 7650 = 22,35 \text{ kg} \quad (64)$$

Počet závitů primárního a sekundárního vinutí

Sekundární vinutí

$$N_2 = U_{2n} \cdot N_e = 100 \cdot 1 = 100 \text{ závitů} \quad (65)$$

Primární vinutí

$$N_1 = k_U \cdot N_2 = \frac{U_{1n}}{U_{2n}} \cdot N_2 = \frac{110 \cdot 10^3}{100} \cdot 100 = 110000 \text{ závitů} \quad (66)$$

Výpočet magnetické indukce pro $U_2 = 80, 100, 120 \% U_{2n}$

Magnetická indukce pro 80 % U_{2n}

$$\begin{aligned} B_{max80\%} &= \frac{0,8 \cdot U_{2n}}{\sqrt{3} \cdot 4,44 \cdot f \cdot N_2 \cdot S_{Fe}} = \\ &= \frac{0,8 \cdot 100}{\sqrt{3} \cdot 4,44 \cdot 50 \cdot 100 \cdot 3,72 \cdot 10^{-3}} = 0,56 \text{ T} \end{aligned} \quad (67)$$

Magnetická indukce pro 100 % U_{2n}

$$\begin{aligned} B_{max100\%} &= \frac{1 \cdot U_{2n}}{\sqrt{3} \cdot 4,44 \cdot f \cdot N_2 \cdot S_{Fe}} = \\ &= \frac{1 \cdot 100}{\sqrt{3} \cdot 4,44 \cdot 50 \cdot 100 \cdot 3,72 \cdot 10^{-3}} = 0,70 \text{ T} \end{aligned} \quad (68)$$

Magnetická indukce pro 120 % U_{2n}

$$\begin{aligned} B_{max120\%} &= \frac{1,2 \cdot U_{2n}}{\sqrt{3} \cdot 4,44 \cdot f \cdot N_2 \cdot S_{Fe}} = \\ &= \frac{1,2 \cdot 100}{\sqrt{3} \cdot 4,44 \cdot 50 \cdot 100 \cdot 3,72 \cdot 10^{-3}} = 0,84 \text{ T} \end{aligned} \quad (69)$$

6.2. Výpočet vinutí

Velikost sekundárního a primárního proudu

Sekundární proud

$$I_{2n} = \frac{S_n}{U_{2n}} = \frac{25 \cdot \sqrt{3}}{100} = 0,433 \text{ A} \quad (70)$$

Primární proud

$$I_{1n} = \frac{I_{2n}}{k_U} = \frac{0,433}{1100} = 393,7 \cdot 10^{-6} \text{ A} \quad (71)$$

Průřez vodičů primárního a sekundárního vinutí

Proudová hustota $\sigma = 2 \text{ A/mm}^2$

a) Primární vinutí

$$S_{v1} = \frac{I_{1n}}{\sigma} = \frac{393,7 \cdot 10^{-6}}{2} = 0,197 \cdot 10^{-3} \text{ mm}^2 \quad (72)$$

Minimální průměr vodiče

$$d_{v1} = \sqrt{\frac{4 \cdot S_{v1}}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,197 \cdot 10^{-3}}{\pi}} = 0,016 \text{ mm} \quad (73)$$

Vodič pro většinu poloh

- Volím průměr izolovaného vodiče $d_{i1} = 0,092 \text{ mm}$ [8]
- Aktivní průřez vodiče $S_1 = 0,0039 \text{ mm}^2$
- Koeficient plnění vinutí na délku: 0,95

Vodič pro první a poslední polohu

- Volím průměr izolovaného vodiče $d_{i1}' = 0,22 \text{ mm}$ [8]
- Aktivní průřez vodiče $S_1' = 0,0284 \text{ mm}^2$
- Koeficient plnění vinutí na délku: 0,95

b) Sekundární vinutí

$$S_{v2} = \frac{I_{2n}}{\sigma} = \frac{0,433}{2} = 0,217 \text{ mm}^2 \quad (74)$$

Minimální průměr vodiče

$$d_{v2} = \sqrt{\frac{4 \cdot S_{v2}}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,217}{\pi}} = 0,525 \text{ mm} \quad (75)$$

- Volím průměr izolovaného vodiče $d_{i2} = 1,9 \text{ mm}$ [8]

- Aktivní průřez vodiče $S_2 = 2,5445 \text{ mm}^2$
- Koeficient plnění vinutí na délku: 0,95

6.3. Návrh primárního vinutí

Vinutí bude navinuto na sekundárním vinutí s izolačním předělem $\delta = 5 \text{ mm}$.

Pro první a poslední polohu bude použit vodič dvojnásobného průřezu. Jednotlivé polohy budou od sebe odděleny izolací o tloušťce $t = 0,225 \text{ mm}$. Vinutí má tvar lichoběžníku, kdy v každé následující poloze je o 2 závity méně než v předchozí poloze.

- Počet závitů primárního vinutí: $N_1 = 110000$ závitů
- Průměr vodiče včetně izolace: $d_{i1} = 0,092 \text{ mm}$
- Průměr vodiče na první a poslední polohu včetně izolace: $d'_{i1} = 0,22 \text{ mm}$
- Koeficient plnění na délku: 0,95
- Délka první polohy: $l_{p1} = 100 \text{ mm}$

Izolací mezi jednotlivými polohami je izolační fólie tloušťky $0,225 \text{ mm}$.

Tloušťka izolace pod 1. a poslední polohou:

$$t'_1 = 4 \cdot 0,225 = 0,675 \text{ mm} \quad (76)$$

Tloušťka mezi zbývajícimi jednotlivými polohami:

$$t_1 = 2 \cdot 0,225 = 0,45 \text{ mm} \quad (77)$$

Průřezy závitů v první a v poslední poloze jsou větší z mechanických a elektrických důvodů.

Počet závitů 1. polohy

$$n_1 = \frac{l_{p1} \cdot 0,95}{d'_{i1}} = \frac{100 \cdot 0,95}{0,22} = 431 \quad (78)$$

Délka druhé polohy: $l_{p2} = 69,76 \text{ mm}$

Počet závitů 2. polohy

$$n_2 = \frac{l_{p2} \cdot 0,95}{d_{i1}} = \frac{69,76 \cdot 0,95}{0,092} = 1030 \quad (79)$$

Délka poslední polohy: $l_{p122} = 76,43 \text{ mm}$

Počet závitů 122. polohy

$$n_{44} = \frac{l_{p122} \cdot 0,95}{d'_{i1}} = \frac{76,43 \cdot 0,95}{0,22} = 330 \quad (80)$$

Počet závitů 121. polohy

$$n_{121} = N_1 - \left(n_{122} + \sum_{i=1}^{120} n_i \right) = 110\,000 - (330 + 108959) = 711 \quad (81)$$

Počet závitů v jednotlivých polohách:

1. Poloha – 431 závitů
2. Poloha – 1030 závitů
3. Poloha – 1028 závitů
4. Poloha – 1026 závitů

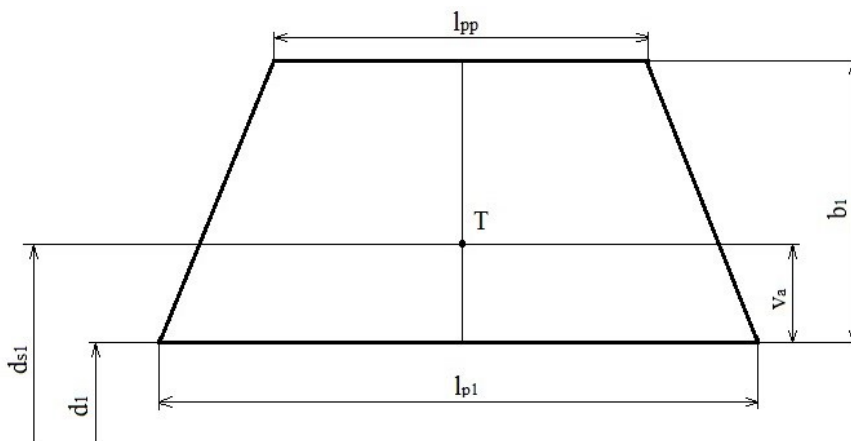
119. Poloha – 796 závitů
120. Poloha – 794 závitů
121. Poloha – 711 závitů
122. Poloha – 330 závitů

Celkový počet – 110 000 závitů (Zbývající počet závitů pro ostatní polohy je v příloze II)

Výška primárního vinutí

$$\begin{aligned} b_1 &= (p_p - 2) \cdot (d_{i1} + t_1) \cdot 1,2 + (2 \cdot d'_{i1} + t_1 + t'_1) \cdot 1,2 = \\ &= (122 - 2) \cdot (0,092 + 0,45) \cdot 1,2 + (2 \cdot 0,22 + 0,45 + 0,675) \cdot 1,2 = \\ &= 79,93 \text{ mm} \end{aligned} \quad (82)$$

Pro výpočet délky vodiče primárního vinutí je potřeba určit průměr, na kterém je střední závit. Tento průměr je dán výškou těžiště vinutí, které má lichoběžníkový tvar, viz obrázek 28.



Obrázek 28 - Rozměry primárního vinutí pro výpočet výšky těžiště v_a

$$\begin{aligned} l_{p1} &= a = 100 \text{ mm} \\ l_{pp} &= c = 76,43 \text{ mm} \\ b_1 &= v = 79,93 \text{ mm} \end{aligned}$$

Výška těžiště, které je ve vzdálenosti v_a od strany $l_{p1} = a$

$$v_a = \frac{v \cdot (a + 2 \cdot c)}{3 \cdot (a + c)} = \frac{79,93 \cdot (100 + 2 \cdot 76,43)}{3 \cdot (100 + 76,43)} = 38,18 \text{ mm} \quad (83)$$

Vnitřní průměr je zvětšený o izolační mezeru $t_{sk} = 2$ mm mezi magnetickým obvodem a sekundárním vinutím.

$$d_1 = d + 2 \cdot (t_{sk} + b_2 + \delta) = 74,92 + 2 \cdot (2 + 5,76 + 5) = 100,44 \text{ mm} \quad (84)$$

Průměr středního závitu

$$d_{s1} = d_1 + 2 \cdot v_a = 100,44 + 2 \cdot 38,18 = 176,81 \text{ mm} \quad (85)$$

Délka vodiče primárního vinutí s průměrem $d_{i1} = 0,092$ mm

$$l_1 = \pi \cdot d_{s1} \cdot (N_1 - n_1 - n_{122}) = \pi \cdot 176,76 \cdot 10^{-3} \cdot (110\,000 - 431 - 330) = 60677,9 \text{ m} \quad (86)$$

Délka vodiče primárního vinutí s průměrem $d'_{i1} = 0,22$ mm

$$l'_1 = \pi \cdot [(d_{s1} + d'_{i1} + 2 \cdot t'_1) \cdot n_1 + (d_{s1} + 2 \cdot b_1 - d'_{i1}) \cdot n_{121}] = \pi \cdot [(176,76 + 0,22 + 2 \cdot 0,675) \cdot 10^{-3}] \cdot 431 + (176,76 + 2 \cdot 79,93 - 0,22) \cdot 10^{-3} \cdot 330 = 590,8 \text{ m} \quad (87)$$

Hmotnost vodičů

Měrná hmotnost mědi: $\gamma_{cu} = 8900 \text{ kg/m}^3$

$$m_{v1} = \gamma_{cu} \cdot (S_1 \cdot l_1 + S'_1 \cdot l'_1) = 8900 \cdot (3,9 \cdot 10^{-9} \cdot 60660,8 + 28,4 \cdot 10^{-9} \cdot 590,7) = 2,26 \text{ kg} \quad (88)$$

6.4. Návrh sekundárního vinutí

Sekundární vinutí bude navinuto na magnetický obvod. Izolační předěl mezi magnetickým obvodem a sekundárním vinutím bude 2 mm, což je zahrnuto ve výpočtech (84) a (91).

Primární a sekundární vinutí jsou od sebe odděleny izolační vzdáleností $\delta = 5$ mm.

- Počet závitů sekundárního vinutí: $N_2 = 100$ závitů
- Volím průměr izolovaného vodiče $d_{i2} = 1,9$ mm [8]
- Aktivní průřez vodiče $S_2 = 2,5445 \text{ mm}^2$
- Koeficient plnění vinutí na délku: 0,95

Izolace mezi vrstvami: Izolační fólie $t_2 = 1$ mm.

Délka cívky $l = 100$ mm

Počet závitů

$$n = \frac{l \cdot 0,95}{d_{i2}} = \frac{100 \cdot 0,95}{1,9} = 50 \quad (89)$$

Vinutí navineme do dvou vrstev: $p_{p2} = 2$

Výška sekundárního vinutí

$$b_2 = [p_p \cdot d_{i2} + (p_p - 1) \cdot t_2] \cdot 1,2 = [2 \cdot 1,9 + (2 - 1) \cdot 1] \cdot 1,9 = 5,76 \text{ mm} \quad (90)$$

Vnitřní průměr sekundárního vinutí (izolační mezera 2 mm)

$$d_2 = d + 2 \cdot 2 = 74,92 + 4 = 78,92 \text{ mm} \quad (91)$$

Vnější průměr sekundárního vinutí

$$d_{v2} = d_2 + 2 \cdot b_2 = 78,92 + 2 \cdot 5,76 = 90,44 \text{ mm} \quad (92)$$

Střední průměr sekundárního vinutí

$$d_{s2} = \frac{d_2 + d_{v2}}{2} = \frac{78,92 + 90,4}{2} = 84,68 \text{ mm} \quad (93)$$

Délka vodiče sekundárního vinutí

$$l_2 = \pi \cdot d_{s2} \cdot N_2 = \pi \cdot 84,63 \cdot 10^{-3} \cdot 100 = 26,603 \text{ m} \quad (94)$$

Hmotnost vodiče sekundárního vinutí

Měrná hmotnost mědi: $\gamma_{cu} = 8900 \text{ kg/m}^3$

$$m_{v2} = \gamma_{cu} \cdot S_2 \cdot l_2 = 8900 \cdot (2,5445 \cdot 10^{-6} \cdot 26,587) = 0,6 \text{ kg} \quad (95)$$

6.5. Výpočet odporů vinutí a reaktancí

Výpočet odporů vinutí

Odpor vinutí při teplotě ϑ :

$$R_{\vartheta} = R_{20} \cdot (1 + \alpha \cdot \Delta\vartheta) = \rho_{20} \cdot \frac{l}{S} \cdot (1 + \alpha \cdot \Delta\vartheta) \quad (96)$$

R_{20} – odpor vinutí při teplotě 20 K [Ω]

ρ_{20} – měrný odpor mědi při teplotě 20 K

$$\rho_{20} = 17,9 \cdot 10^{-9} \text{ Ω} \cdot \text{m} [9]$$

l – délka vodiče [m]

S – průřez vodiče [m²]

α_T – teplotní součinitel odporu mědi

$$\alpha_T = 0,0039 \text{ K}^{-1} [9]$$

Měrný odpor mědi při teplotním rozdílu $\Delta\vartheta = 20 \text{ K}$

$$\rho = \rho_{20} \cdot (1 + \alpha \cdot \Delta\vartheta) = 17,9 \cdot 10^{-9} \cdot (1 + 3,9 \cdot 10^{-3} \cdot 20) = 19,3 \cdot 10^{-9} \Omega \cdot m \quad (97)$$

Odpor primárního vinutí

$$R_1 = \rho \cdot \left(\frac{l_1}{S_1} + \frac{l'_1}{S'_1} \right) = 19,3 \cdot 10^{-9} \cdot \left(\frac{60677,9}{3,9 \cdot 10^{-9}} + \frac{590,8}{28,4 \cdot 10^{-9}} \right) = 300,621 \text{ k}\Omega \quad (98)$$

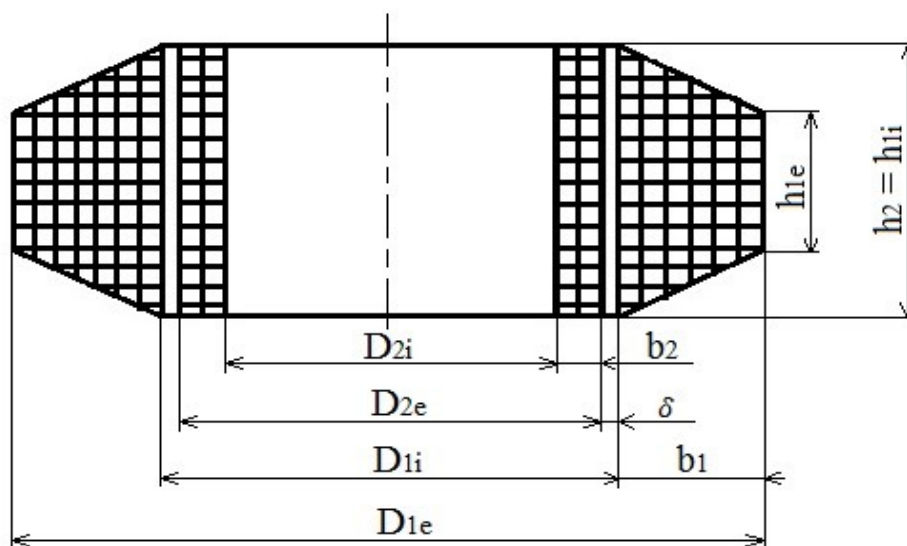
Přepočet R_1 na sekundární vinutí

$$R'_{12} = R_1 \cdot \left(\frac{N_2}{N_1} \right)^2 = 300,621 \cdot 10^3 \cdot \left(\frac{100}{110 \cdot 10^3} \right)^2 = 0,25 \Omega \quad (99)$$

Odpor sekundárního vinutí

$$R_2 = \rho \cdot \frac{l_2}{S_2} = 19,3 \cdot 10^{-9} \cdot \frac{26,587}{2,5445 \cdot 10^{-6}} = 0,202 \Omega \quad (100)$$

Výpočet reaktance vinutí



Obrázek 29 - Rozměry vinutí transformátoru

Dle obrázku 29:

$$D_{2i} = 74,92 \text{ mm} \quad \text{viz (56)}$$

$$D_{2e} = 90,44 \text{ mm} \quad \text{viz (92)}$$

$$D_{1i} = 100,44 \text{ mm} \quad \text{viz (84)}$$

$$D_{1e} = 260,3 \text{ mm}$$

$$b_1 = 79,93 \text{ mm} \quad \text{viz (82)}$$

$$b_2 = 5,76 \text{ mm} \quad \text{viz (90)}$$

$$\delta = 5 \text{ mm}$$

$$h_2 = 100 \text{ mm}$$

$$h_{1i} = 100 \text{ mm}$$

$$h_{1e} = 76,43 \text{ mm}$$

Redukovaná šířka primárního vinutí

$$b_{r1} = \frac{b_1}{3} \cdot \left(1 - \frac{1}{2} \cdot \frac{h_{1i} - h_{1e}}{h_{1i} + h_{1e}}\right) = \frac{79,93}{3} \cdot \left(1 - \frac{1}{2} \cdot \frac{100 - 76,43}{100 + 76,43}\right) = 24,86 \text{ mm} \quad (101)$$

Redukovaná šířka sekundárního vinutí

$$b_{r2} = \frac{b_2}{3} = \frac{5,76}{3} = 1,92 \text{ mm} \quad (102)$$

Obvod rozptylového kanálu

$$O_m = \frac{\pi}{2} \cdot \left(D_{2e} + D_{1i} + \frac{2 \cdot (b_1 - b_2)}{3}\right) = \frac{\pi}{2} \cdot \left(90,44 + 100,44 + \frac{2 \cdot (79,93 - 5,76)}{3}\right) = 377,5 \text{ mm} \quad (103)$$

Rozptylová reaktance vinutí

$$h'_1 = \frac{1}{4} \cdot (3 \cdot h_{1i} + h_{1e}) = \frac{1}{4} \cdot (3 \cdot 100 + 76,43) = 94,11 \text{ mm} \quad (104)$$

$$\begin{aligned} X_\sigma &= 7,9 \cdot 10^{-6} \cdot 50 \cdot N_1^2 \cdot O_m \cdot \left(\frac{b_{r2}}{h_2} + \frac{\delta}{h_2} + \frac{b_{r1}}{h'_1}\right) = \\ &= 7,9 \cdot 10^{-6} \cdot 50 \cdot 110000^2 \cdot 377,5 \cdot 10^{-3} \cdot \left(\frac{0,00192}{0,1} + \frac{0,005}{0,1} + \frac{0,0249}{0,0941}\right) = \\ &= 601,525 \text{ k}\Omega \end{aligned} \quad (105)$$

6.6. Určení chyb transformátoru

Přepočet na 1 závit

Odpor primárního vinutí

$$r_1 = \frac{R_1}{N_1^2} = \frac{300,621 \cdot 10^3}{(110 \cdot 10^3)^2} = 24,85 \cdot 10^{-6} \Omega/z \quad (106)$$

Odpor sekundárního vinutí

$$r_2 = \frac{R_2}{N_2^2} = \frac{0,202}{100^2} = 20,2 \cdot 10^{-6} \Omega/z \quad (107)$$

Rozptylová reaktance

$$x_\sigma = \frac{X_\sigma}{N_1^2} = \frac{601,525 \cdot 10^3}{(110 \cdot 10^3)^2} = 49,71 \cdot 10^{-6} \Omega/z \quad (108)$$

Vnitřní účinník

$$tg\beta_k = \frac{x_\sigma}{r_1 + r_2} = \frac{49,71 \cdot 10^{-6}}{24,85 \cdot 10^{-6} + 20,2 \cdot 10^{-6}} = 1,104 \quad (109)$$

Tabulka 3 – Odečet hodnot pro výpočet admitance naprázdno (plech Eo 11) [5]

U_{1n} [%]	B_{max} [T]	a_0 [A·m ⁻¹]	μ_c [H·m ⁻¹]	p_{Fe} [W·kg ⁻¹]	μ_w [H·m ⁻¹]	$\cos\beta_0$ [-]	$\sin\beta_0$ [-]	Y_0 [S]
80	0,56	11	0,051	0,10	0,091	0,5594	0,8289	18,7
100	0,70	15	0,047	0,26	0,055	0,8533	0,5214	20,44
120	0,84	18	0,046	0,42	0,049	0,9572	0,2894	20,44

Odečetl jsem hodnoty a_0 a p_{Fe} pro B_{max} z grafů v příloze I.

Příklad výpočtu v tabulce 3:

$$\mu_c = \frac{B_{max}}{a_0} = \frac{0,56}{11} = 0,051 \text{ H} \cdot \text{m}^{-1} \quad (110)$$

$$\mu_w = \frac{222 \cdot B_{max}^2}{\rho_{Fe} \cdot p_{Fe}} = \frac{222 \cdot 0,56^2}{7650 \cdot 0,1} = 0,091 \text{ H} \cdot \text{m}^{-1} \quad (111)$$

$$\cos\beta_0 = \frac{\mu_c}{\mu_w} = \frac{0,051}{0,091} = 0,5594 \quad (112)$$

$$\sin\beta_0 = \sqrt{1 - \cos\beta_0^2} = \sqrt{1 - 0,5594^2} = 0,8289 \quad (113)$$

$$Y_0 = \frac{l_{Fe}}{222 \cdot \mu_c \cdot S_{Fe}} = \frac{0,787}{222 \cdot 0,051 \cdot 3,72 \cdot 10^{-3}} = 18,7 \text{ S} \quad (114)$$

Hodnoty zátěže

$$\begin{aligned} \cos\beta &= 0,8 \\ \sin\beta &= 0,6 \end{aligned}$$

Tabulka 4 - Výpočet admitance transformátoru napětí

$P_{n\%}$	[%]	25	50	75	100
P_n	[VA]	6,25	12,5	18,75	25
Y	[S]	18,75	37,5	56,25	75

Příklad výpočtu pro zátěž 25 %, v tabulce 4:

$$P_{n25} = \frac{P_{n\%} \cdot 25}{100} = \frac{25 \cdot 25}{100} = 6,25 \text{ VA} \quad (115)$$

Příklad výpočtu admitance transformátoru napětí pro zátěž 25 %

$$Y_{25} = P_{n25} \cdot \left(\frac{N_2}{U_{2n}} \right)^2 = 6,25 \cdot \left(\frac{100 \cdot \sqrt{3}}{100} \right)^2 = 18,75 \text{ S} \quad (116)$$

Výpočet chyb

Chyba napětí naprázdno

$$\varepsilon_{u0} = -r_1 \cdot Y_0 \cdot (\cos\beta_0 + tg\beta_k \cdot \sin\beta_0) \cdot 100 [\%] \quad (117)$$

$$U_{n80\%}: \varepsilon_{u080} = -24,85 \cdot 10^{-6} \cdot 18,7 \cdot (0,5594 + 1,104 \cdot 0,8289) \cdot 100 = -0,069 \%$$

$$U_{n100\%}: \varepsilon_{u0100} = -24,85 \cdot 10^{-6} \cdot 20,44 \cdot (0,8533 + 1,104 \cdot 0,5214) \cdot 100 = -0,073 \%$$

$$U_{n120\%}: \varepsilon_{u0120} = -24,85 \cdot 10^{-6} \cdot 20,44 \cdot (0,9572 + 1,104 \cdot 0,2894) \cdot 100 = -0,065 \%$$

Chyba úhlu naprázdno

$$\delta_{u0} = -3440 \cdot r_1 \cdot Y_0 \cdot (\sin\beta_0 - tg\beta_k \cdot \cos\beta_0) [\text{min}] \quad (118)$$

$$U_{n80\%}: \delta_{u080} = 3440 \cdot 24,85 \cdot 10^{-6} \cdot 18,7 \cdot (0,8289 - 1,104 \cdot 0,5594) = 0,338 \text{ min}$$

$$U_{n100\%}: \delta_{u0100} = -3440 \cdot 24,85 \cdot 10^{-6} \cdot 20,44 \cdot (0,5214 - 1,104 \cdot 0,8533) = 0,735 \text{ min}$$

$$U_{n120\%}: \delta_{u0120} = -3440 \cdot 24,85 \cdot 10^{-6} \cdot 20,44 \cdot (0,2894 - 1,104 \cdot 0,9572) = 1,341 \text{ min}$$

Chyba napětí při zatížení

$$\varepsilon_{uy} = -(r_1 + r_2) \cdot Y \cdot (\cos\beta + tg\beta_k \cdot \sin\beta) \cdot 100 [\%] \quad (119)$$

$$P_{n25\%}: \varepsilon_{uy25} = -(24,85 \cdot 10^{-6} + 20,2 \cdot 10^{-6}) \cdot 18,75 \cdot (0,8 + 1,104 \cdot 0,6) \cdot 100 = -0,124 \%$$

$$P_{n50\%}: \varepsilon_{uy50} = -(24,85 \cdot 10^{-6} + 20,2 \cdot 10^{-6}) \cdot 37,5 \cdot (0,8 + 1,104 \cdot 0,6) \cdot 100 = -0,247\%$$

$$P_{n75\%}: \varepsilon_{uy75} = -(24,85 \cdot 10^{-6} + 20,2 \cdot 10^{-6}) \cdot 56,25 \cdot (0,8 + 1,104 \cdot 0,6) \cdot 100 = -0,37 \%$$

$$P_{n100\%}: \varepsilon_{uy100} = -(24,85 \cdot 10^{-6} + 20,2 \cdot 10^{-6}) \cdot 75 \cdot (0,8 + 1,104 \cdot 0,6) \cdot 100 = -0,494 \%$$

Chyba úhlu při zatížení

$$\delta_{uy} = -3440 \cdot (r_1 + r_2) \cdot Y \cdot (\sin\beta - tg\beta_k \cdot \cos\beta) [\text{min}] \quad (120)$$

$$P_{n25\%}: \delta_{uy25} = -3440 \cdot (24,85 \cdot 10^{-6} + 20,2 \cdot 10^{-6}) \cdot 18,75 \cdot (0,6 - 1,104 \cdot 0,8) = 0,823 \text{ min}$$

$$P_{n50\%}: \delta_{uy50} = -3440 \cdot (24,85 \cdot 10^{-6} + 20,2 \cdot 10^{-6}) \cdot 37,5 \cdot (0,6 - 1,104 \cdot 0,8) = 1,646 \text{ min}$$

$$P_{n75\%}: \delta_{uy75} = -3440 \cdot (24,85 \cdot 10^{-6} + 20,2 \cdot 10^{-6}) \cdot 56,25 \cdot (0,6 - 1,104 \cdot 0,8) = 2,469 \text{ min}$$

$$P_{n100\%}: \delta_{uy100} = -3440 \cdot (24,85 \cdot 10^{-6} + 20,2 \cdot 10^{-6}) \cdot 75 \cdot (0,6 - 1,104 \cdot 0,8) = 3,292 \text{ min}$$

Tabulka 5 - Výsledné chyby transformátoru (Obrázek 30)

U_{2n}	P_n	ε_{un}	δ_{un}
%	VA	%	min
80	6,25	-0,193	1,161
80	12,5	-0,316	1,984
80	18,75	-0,439	2,807
80	25	-0,563	3,630
100	6,25	-0,197	1,558
100	12,5	-0,320	2,381
100	18,75	-0,443	3,204
100	25	-0,567	4,027
120	6,25	-0,189	2,164
120	12,5	-0,312	2,987
120	18,75	-0,435	3,810
120	25	-0,559	4,633

Chyba napětí (Tab 5):

$$\varepsilon_{un} = \varepsilon_{u0} + \varepsilon_{uy} = -0,069 + (-0,123) = -0,193 \% \quad (121)$$

Chyba úhlu (Tab 5):

$$\delta_{un} = \delta_u + \delta_{uy} = 0,338 + 0,823 = 1,161 \text{ min} \quad (122)$$

Z obrázku 30 lze vidět, že chyby napětí nejsou v povoleném rozsahu třídy přesnosti. Pro umístění rozsahu skutečného pole chyb do dovoleného pole chyb pro třídu přesnost $T_p = 0,5 \%$ je potřeba provést závitovou korekci. Tím se posune pole skutečných chyb ke kladným hodnotám chyb napětí. K tomu je potřeba snížit počet závitů na primární straně.

Velikost korekce $v = 0,25\%$.

Výpočet korekčních závitů

$$\Delta N_1^k = \frac{v}{100} \cdot N_1 = \frac{0,25}{100} \cdot 110000 = 275 \quad (123)$$

Počet závitů primárního vinutí po provedení korekce

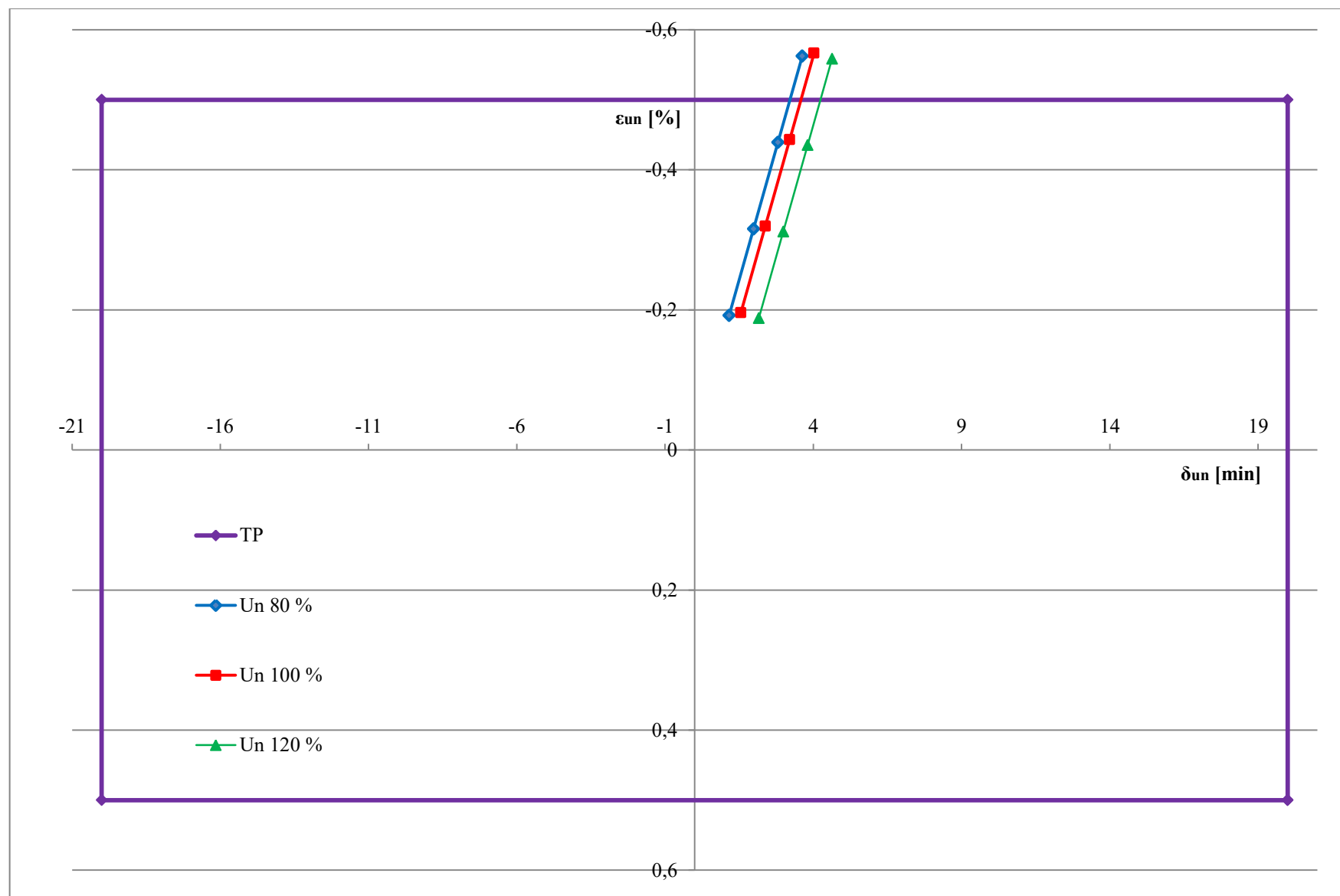
$$N_1^k = N_1 - N_k = 110000 - 275 = 109725 \quad (124)$$

Tabulka 6 - Výsledné chyby transformátoru po korekci (Obrázek 31)

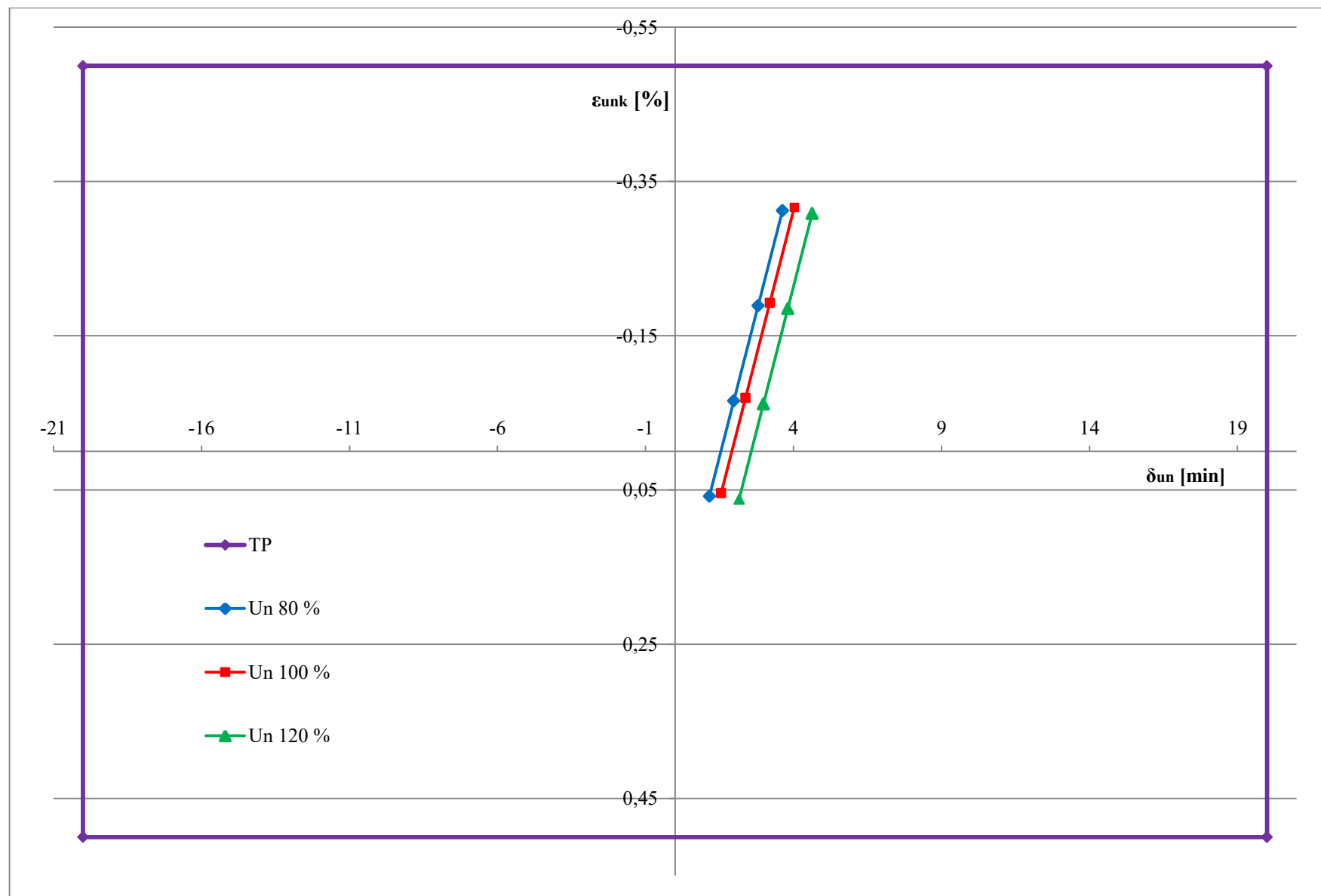
U_{2n}	P_n	ε_{unk}	δ_{un}
%	VA	%	min
80	6,25	0,057	1,161
80	12,5	-0,066	1,984
80	18,75	-0,190	2,807
80	25	-0,313	3,630
100	6,25	0,053	1,558
100	12,5	-0,070	2,381
100	18,75	-0,193	3,204
100	25	-0,317	4,027
120	6,25	0,061	2,164
120	12,5	-0,062	2,987
120	18,75	-0,185	3,810
120	25	-0,309	4,633

Výpočet chyby napětí se zahrnutím korekce, viz tabulka 6:

$$\varepsilon_{unk} = \varepsilon_{un} + \nu = -0,193 + 0,25 = 0,057\% \quad (125)$$



Obrázek 30 - Komplexní diagram chyb před korekcí



Obrázek 31 - Komplexní diagram chyb po korekci

7. Zhodnocení

Cílem této práce bylo navrhnout měřicí transformátor napětí pro $P_n = 25 \text{ VA}$, $U_{1n} = 110 \text{ kV}$ a $T_p = 0,5 \%$. První návrh pro počet závitů na primární straně $N_1 = 110\,000$ závitů nevyhověl dané třídě přesnosti. Bylo nutné provést závitovou korekci. Tím dojde k posunutí pole skutečných chyb napětí ke kladným hodnotám chyb napětí. Velikost korekce je $v = 0,25 \%$, což odpovídá snížení počtu závitů na primární straně o 275 závitů. Výsledný počet závitů na primární straně bude $N_{1k} = 109\,725$ závitů. Výsledek této korekce je zobrazen v grafu 2. Vhodným zvětšením průřezu sekundárního vinutí jsem docílil také zmenšení chyby úhlu.

Z důvodů jednodušší výroby jsem zvolil dělené C jádro s čtvercovým pětistupňovým průřezem. Tohle jádro je tvořené orientovanými plechy Eo 11 tloušťky 0,35 mm. Vnitřní rozměry magnetického obvodu - délka 150 mm a výška 130 mm. Na odstupňované jádro, přepočtené na kruhový průměr $d = 74,92 \text{ mm}$, bude postupně navinuto sekundární vinutí a dále primární vinutí.

Výška navrženého sekundárního vinutí je 5,76 mm a jeho šířka je 100 mm. Toto vinutí má 2 polohy a v každé je 50 závitů. Volil jsem vodič s průměrem 1,9 mm a mezi polohovou izolaci fólií o tloušťce 1 mm.

Izolační vzdálenost, mezi primárním a sekundárním vinutím, jsem zvolil $\delta = 5 \text{ mm}$. Tato vzdálenost by měla stačit z toho důvodu, protože se jedná o jednopólový izolovaný transformátor.

Pro primární vinutí jsem volil vodič průměru 0,092 mm a pro první a poslední polohu jsem vybral vodič o průměru 0,22 mm. Zesílený vodič jsem zvolil z důvodu mechanické ochrany a také z důvodu ochrany při šíření přepětí, které nejvíce zatěžuje krajní polohy. Izolační fólie pro první a poslední polohu je tloušťky 0,45 mm a mezi ostatními polohami 0,675 mm. Zvolil jsem lichoběžníkové vinutí z důvodu lepšího rozložení elektrického pole, tak, aby v každé poloze bylo 2 závity méně. Celkový počet závitů je 109 725. Výšku vinutí jsem vypočetl 79,93 mm. Jeho šířka první polohy je 100 mm a šířka poslední polohy je 76,43 mm.

Tento transformátor napětí je nakreslený a okótovaný na výkresu v příloze III. Výkres jsem nakreslil v programu Solidworks, který je ve studentské verzi k dostání zdarma na internetové stránce <http://eshop.solidvision.cz/demo-solidworks-solidcam/>.

Navržený měřicí transformátor napětí lze použít, po provedení korekce, pro všechny zadané parametry. Chyby napětí a úhlu nepřekročí rozsah dovolených chyb pro danou třídu přesnosti 0,5 %. Výsledky výpočtu chyb transformátoru jsou uvedeny v tabulkách 5 a 6 a vyneseny v diagramech na obrázcích 30 a 31.

7.1. Porovnání olejových a SF₆ transformátorů

a) Olejové transformátory

- Starší
- Minerální olej je ropným produktem s podobnými vlastnostmi jako lehký topný olej nebo nafta
- Tento olej perfektně izoluje a výborně odvádí přebytečné teplo
- Je však značně hořlavý a při nekontrolovatelném úniku zatěžuje životní prostředí
- Transformátory bývají netěsné a je nutné často odebírat a analyzovat vzorky, z důvodů stárnutí a změně fyzikálních vlastností oleje
- Menší požadavky na krytí
- Nižší pořizovací cena, ale větší náklady na údržbu

b) SF₆ transformátor

- Transformátor je umístěný uvnitř budovy a hermeticky uzavřený
- Nehrozí možnost výbuchu
- Nutnost použití tzv. „čičačů“, které hlídají únik plynu, neboť havárie by mohla způsobit ekologickou katastrofu, případně udušení osob nacházejících se v uzavřené místnosti
- Větší požadavky na krytí
- Vyšší pořizovací cena, ale minimální požadavky na údržbu v dlouhém časovém úseku
- Menší rozměry - pro vyšší napěťové hladiny odpovídají rozměrům nižších napěťových hladin u olejových transformátorů
- Prioritou je přesnost rozměrů a kvalita zpracování transformátorů
- Návrh transformátoru je velmi komplikovaný

Seznam literatury

- [1] KOPEČEK, Jan a Miloš DVOŘÁK. *Přístrojové transformátory (měřicí a jistící)*. Praha, Academia, 1966
- [2] https://www.cez.cz/edee/content/file/static/encyklopedie/encyklopedie-energetiky/05/soustavy_3.html
- [3] VÁVRA, Zdeněk, Vladimír NOVOTNÝ a Zdeněk VOSTRACKÝ. *Stavba elektrických přístrojů II*. VUT Brno, 1985
- [4] NOVOTNÝ, Vladimír. *Využití elektronegativního plynu SF₆ v elektrotechnice*. Praha, SNTL, 1982
- [5] KRÁL, Josef a Jaromír VANĚK. *Elektromagnetické přístroje*. VUT Brno, 1984.
- [6] MRAVEC, Rudolf. *Elektrické stroje a přístroje I*. Praha, SNTL, 1979
- [7] HAVELKA, Otto a kolektiv. *Elektrické přístroje*. Praha, SNTL, 1985
- [8] FAKTOR, Zdeněk, *Transformátory a cívky*, Praha, BEN, 1999
- [9] HAVELKA, Otto, VÁVRA Z., Svoboda D., *Podklady a příklady pro navrhování elektrických přístrojů I*. VUT Brno, 1985
- [10] HAVELKA, Otto. *Stavba elektrických přístrojů I*. VUT Brno, 1985
- [11] DASGUPTA, Indrajit. *Design of transformers*. McGraw-Hill Education, 2002

Seznam příloh

Příloha I - Grafy závislosti $B = f(a_0)$ a $B = f(p_{Fe})$

Příloha II - Rozdělení závitů v primárním vinutí

Příloha III - Výkres měřicího transformátoru napětí